

VŠB – Technická univerzita Ostrava

Fakulta elektrotechniky a informatiky

Katedra elektroenergetiky

Vakuová indukční pec - modelová elektromagnetická analýza

Vacuum Inducting furnace - Simulation of Electromagnetic Field

Poděkování:

Rád bych poděkoval Ing. Martinu Markovi, Ph.D. a Ing. Petru Kačorovi, Ph.D. za jejich odbornou pomoc při tvorbě diplomové práce. Dále bych chtěl také poděkovat své rodině a přátelům za podporu při studiu.

Prohlášení:

„Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracoval samostatně a uvedl jsem všechny literární prameny a publikace, ze kterých jsem čerpal.“

Datum odevzdání diplomové práce 7.5. 2010, v Ostravě

.....

Lukáš Hroch

Abstrakt:

V diplomové práci se zabývám analýzou elektromagnetického pole induktoru a taveniny vakuové indukční pece (VIP) pro různé varianty pracovních proudů a frekvencí. V první kapitole se zaměřuji na základní teorii indukčního ohřevu. Další kapitola navazuje na obecně platné principy ohřevu a fyzikální závislosti s tím spojené. Třetí kapitola obsahuje dělení indukčních pecí podle konstrukce, frekvence a napájecích zdrojů. Poslední část je zameřena na vlastní řešení modelové elektromagnetické analýzy VIP. V této kapitole je řešena 3D harmonická analýza pomocí programu Ansys 11.

Abstract:

In diploma work I work on analysis magneto of electromagnetic field and melt vacual induction furnace (VIF) for various variants making current and frequency. In first chapter I survey on philosophy induction heating. Next chapter tie together on general principles warming up and physical dependencies accompanying. Third chapter includes dividing induction furnace after construction, frequency and power supply. Last part is survey on own solving modelling electromagnetic analyses VIF. In those chapter is solutions 3D harmonic analysis by the help of programme Ansys 11.

Klíčová slova:

Indukční vakuová pec, vodivý kelímek, keramická vložka, cívka, induktor, izolace, kanálek, vinutí, zdroj, vsázka, magnetické jádro, magnetická permeabilita, indukčnost, ansys, vířivé proudy, ztráty.

Key words:

Inductive vacuum furnace, conductive dish, ceramic enclosure, inductor, isolation, channel, winding, source, charge, magnetic core, magnetic permeability, inductivity, ansys, eddy currents, losses.

Seznam použitých symbolů:

Symbol	Veličina	Jednotka
I	elektrický proud	A
U	elektrické napětí	V
μ	permeabilita	H. m⁻¹
ϵ	permitivita	F. m⁻¹
t	čas	s
G	elektrická vodivost	S
λ	tepelná vodivost	W. m⁻¹. K⁻¹
c	měrná tepelná kapacita	J. kg⁻¹K⁻¹
γ	měrná el. vodivost	S. m⁻¹
f	frekvence	Hz
T	teplota	°C
P	výkon	W
η_{el}	elektrická účinnost	%
E	intenzita elektrického pole	V. m⁻¹
H	intenzita magnetického pole	A. m⁻¹
Φ	magnetický tok	Wb
B	magnetická indukce	T
R	odpor	Ω

ÚVOD:.....	1
1. INDUKČNÍ OHŘEV OBECNĚ:	2
1.1. ZÁKON ELEKTROMAGNETICKÉ INDUKCE	4
1.2. INDUKOVANÉ ELEKTROMOTORICKÉ NAPĚTÍ	7
2. FYZIKÁLNÍ ZÁVISLOSTI INDUKČNÍHO OHŘEVU	8
3. INDUKČNÍ PECE	18
3.1. ROZDĚLENÍ INDUKČNÍCH PECÍ PODLE KONSTRUKCE	18
3.1.1. Indukční kelímková pec s vodivým kelímkem.....	18
3.1.2. Indukční kelímková pec s nevodivým kelímkem.....	19
3.1.3. Indukční kanálková pec	19
3.1.4. Indukční prohřívací zařízení.....	21
3.1.5. Kalení.....	22
3.1.6. Pájení.....	23
3.1.7. Svařování.....	23
3.1.8. Žihání.....	24
3.2. ROZDĚLENÍ INDUKČNÍCH PECÍ PODLE FREKVENCE.....	24
3.2.1. Kmitočet sítě	24
3.2.2. Nízkofrekvenční.....	24
3.2.3. Středofrekvenční	24
3.2.4. Vysokofrekvenční	24
3.3. ZDROJE PRO NAPÁJENÍ INDUKČNÍCH OHŘÍVACÍCH ZAŘÍZENÍ.....	25
3.3.1. Napájení ze sítě 3 x 400/230 V, 50 Hz.....	25
3.3.2. Středofrekvenční zdroje napájen	26
3.3.3. Rotační středofrekvenční generator	27
3.3.4. Tyristorové měniče kmitočtu pro středofrekvenční indukční ohřevy	28
3.3.5. Vysokofrekvenční elektronkový generátor nad 50 kHz.....	29
4. VLASTNÍ ŘEŠENÍ – ANALÝZA VAKUOVÉ INDUKČNÍ PECE	31
4.1. INDUKTOR	32
4.2. NAPÁJECÍ ZDROJ.....	32
4.3. VYZDÍVKA PECE	33
4.4. POPIS A CÍLE VLASTNÍHO ŘEŠENÍ	34
4.4.1. ČÁST 1.: Tvorba geometrie modelu.....	34
4.4.2. ČÁST 2.: Vytvoření výpočetní sítě	36
4.4.3. Elementy použité k výpočtu:	40
4.4.4. Harmonická analýza:	43
4.4.5. Měrný elektrický odpor	45
4.4.6. ČÁST 3.: Přehled výsledků 3D harmonické analýzy.....	46
ZÁVĚR:	53
SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY A CITACÍ:	54

Úvod:

Indukční ohřev je technologie relativně nová. Indukční ohřev se neustále vylepšuje a zdokonaluje v současnosti se tato technologie využívá hojně v průmyslu např. při kalení, tavení, žíhání, svařování. Kromě použití v průmyslových aplikacích se tento způsob ohřevu vyskytuje i v domácnostech např. varná konvice, pračka.

Vzhledem k tomu, že indukční ohřev je proces zpravidla energeticky velmi náročný, je nutné celý systém optimalizovat tak, aby při zadaných požadavcích na průběh procesu byla jeho účinnost co nejvyšší, toho dosáhneme pomocí přímého ohřevu. Mezi hlavní výhody indukčního ohřevu patří především úspora energie, protože se materiál ohřívá přímo. Další výhodou je relativně snadné řízení intenzity ohřevu a v neposlední řadě je tento ohřev šetrný k životnímu prostředí je to dáno díky ochranné atmosféře ve které se ohřev provádí.

Diplomovou práci jsem rozdělil do několika kapitol. V první části popisuji základní teorii indukčního ohřevu a vůbec princip ohřevu a s tímto spojený zákon elektromagnetické indukce. Druhou částí jsou obecně platné principy a fyzikální vlastnosti, které úzce souvisí s indukčním ohřevem. Tato kapitola zahrnuje jak účinnost indukčních pecí, hysterezní smyčky tak i základní vzorce. Další kapitola se týká rozdělení indukčních pecí podle různých kritérií např. dělení podle konstrukce, frekvence nebo rozdělení podle zdrojů napájení. V poslední kapitole je uvedena vlastní elektromagnetická analýza, návrh a výpočet modelu indukční vakuové pece (induktor ve tvaru spirály) v programovém prostředí SOLIDWORKS. Zde je také uvedena 3D harmonická analýza elektromagnetického pole za pomoci programu ANSYS 11.

1. Indukční ohřev obecně:

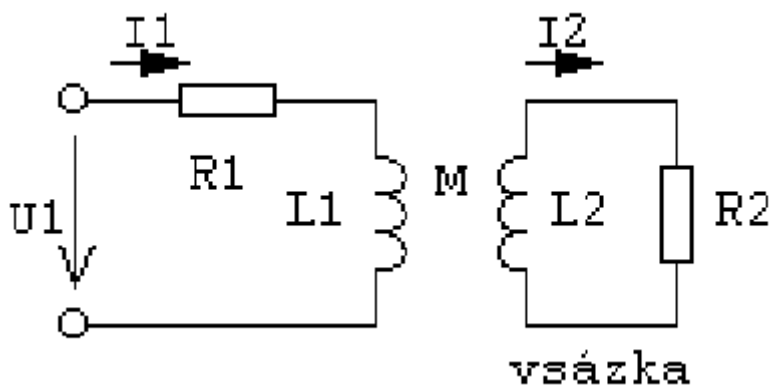
Indukční ohřev je technologie ohřevu využívaná v průmyslových aplikacích již více než sedmdesát let. Jeho aplikace je možná pouze pro elektricky vodivé materiály. Základní představa je taková, že cívka napájená vysokofrekvenčním proudem vyvolá střídavé magnetické pole. Vložíme-li do tohoto magnetického pole elektricky vodivý předmět, který chceme ohřívat, indukují se v tomto předmětu vířivé proudy (proto musí být ohříváný předmět vodivý).

Tyto proudy postupně zahřívají materiál od povrchových vrstev, kde mají proudy největší proudovou hustotu, směrem dovnitř. Teplo se do ohříváného předmětu (vsázky) nedopravuje pomocí tepelného spádu, jak je tomu u nepřímého způsobu ohřevu, ale vzniká přímo ve vsázce prostřednictvím elektromagnetického pole. Teplo se tak soustředí nejvíce ve vsázce a ta se stává nejteplejším objektem celé soustavy. Tímto způsobem lze do vsázky dostat poměrně velké množství příkonu.

Schematicky si princip indukčního ohřevu můžeme představit podle vyobrazeného schématu jako dvě cívky navzájem spřažené vzájemnou indukčností M . Primární cívka je napájena vysokofrekvenčním proudem a je tvořena vlastní indukčností $L1$ a v sérii se svým ztrátovým činným odporem $R1$. Vsázku představuje sekundární cívka s indukčností $L2$, která je spojena nakrátko přes činný odpor $R2$. Kmitočtem proudu primární cívkou $L1$ lze ovlivnit přenos energie mezi cívkami a tedy i rozdělení tepla vyvíjeného ve vsázce.

Bude-li cívka napájena proudem i jiném kmitočtu než je síťový kmitočet, bude základní členění indukčních ohřevů následující:

- indukční ohřevy s nízkým kmitočtem (50 - 150 Hz)
- indukční ohřevy se středním kmitočtem (500 - 10^5 Hz)
- indukční ohřevy s vysokým kmitočtem (10^5 - 10^6 Hz)



Obr. 1: Schematické znázornění indukčního ohřevu

Významné použití indukčního ohřevu představuje indukční pec. Indukční pece se dnes užívají v ocelářství i v metalurgii neželezných kovů a mohou mít kapacitu až stovek tun.

Mezi jeho hlavní výhody indukčního ohřevu patří:

- * relativně snadné řízení intenzity ohřevu a rozložení teplot ve vsázce
- * absence chemických změn v povrchových vrstvách vsázky (k čemuž dochází například při ohřevu plynem) což může vést ke zhoršování fyzikálních vlastností materiálu
- * šetrnost k životnímu prostředí (odpadají problémy s produkty, z nichž některé mohou být i toxické).
- * úspora energie, protože se materiál ohřívá přímo
- * možnost provádět ohřev v ochranné atmosféře nebo ve vakuu

Vzhledem k tomu, že indukční ohřev je proces zpravidla energeticky velmi náročný, je nezbytné celý systém (induktor, vsázka a další prvky) optimalizovat tak, aby při zadaných požadavcích na průběh procesu byla jeho účinnost co nejvyšší. Navíc je často zapotřebí dodržet určitý časový režim ohřevu, případně jiné parametry (rozložení teplot apod.).

V určitých situacích je možno provést korektní návrh systému splňujícího uvedené požadavky na základě předchozích zkušeností. Většinou se však tento návrh neobejde bez vyřešení přesného matematického modelu a provedení optimalizace.

Indukční ohřev je obecně popsán dvěma nelineárními parciálními diferenciálními rovnicemi parabolického typu. První z nich popisuje rozložení elektromagnetického pole vybuzeného induktory (jež má prostorový charakter a může se navíc měnit s časem), druhá (Fourier-Kirchhoffova) pak pole teplot, které je již zpravidla výrazně nestacionární. Pokud dojde k roztavení ohřívaného materiálu, je nutno dalšími diferenciálními rovnicemi respektovat i případný pohyb taveniny vyvolaný Lorentzovými a vztakovými silami.

V jiných případech je nutné zase respektovat termoelastické deformace materiálu (Lamého rovnice), případně i deformace plastické. Řešení vzniklých soustav rovnic je velice komplikované zejména proto, že jejich koeficienty dané materiálovými vlastnostmi jsou závislé na teplotě a magnetická permeabilita (je-li přítomno feromagnetikum) i na velikosti magnetického pole.

V některých případech se mohou objevit i další potíže se stanovením okrajových podmínek (elektromagnetické pole nemusí být ohraničené), v případě teplotního pole může být nesnadné stanovení koeficientů charakterizujících konvekci tepla do okolního prostředí či sálání, s geometrickou nesouměřitelností (např. ohřev tenkých plechů), s měnícím se proudem v induktoru ať už v důsledku zvyšující se rezistance (cívka se protékajícím proudem ohřívá) či poklesu reaktance celého obvodu (permeabilita feromagnetické vsázky se s rostoucí teplotou snižuje), s pohybem vsázky či induktoru atd.

1.1. Zákon elektromagnetické indukce

Je fyzikální zákon, který vyslovil v r. 1831 Michael Faraday. Tento zákon pojednává o vzniku elektrického napětí v uzavřeném elektrickém obvodu, který je způsoben změnou magnetického indukčního toku, což je označováno jako **elektromagnetická indukce**.

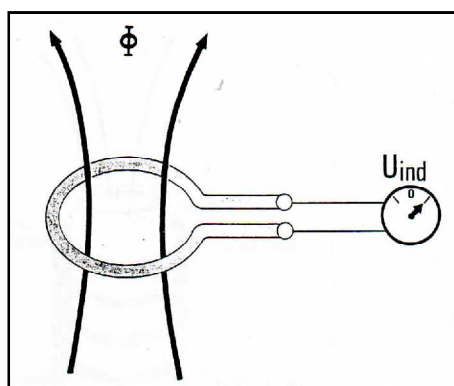
Experimenty zkoumající elektromagnetickou indukci umožnily spojit hodnotu indukovaného elektromotorického napětí se změnami magnetického toku procházejícího elektrickým obvodem. Bylo zjištěno, že hodnota indukovaného elektromotorického napětí je rovna časové změně celkového magnetického toku, který prochází elektrickým obvodem, což se zapisuje ve tvaru

$$U_{\text{ind}} = - \frac{d\Phi}{dt} \quad (1)$$

U_{ind} – napětí indukované [V]

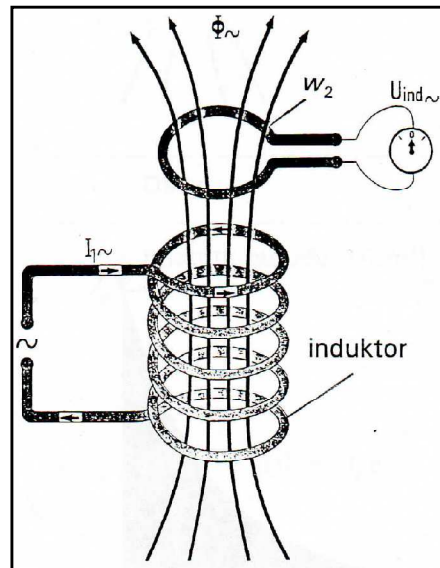
$d\Phi$ – představuje celkový magnetický tok, který protéká smyčkou (obvodem) [V_s]

dt – čas [t]



Obr. 2: Princip vzniku magnetického toku

Na obr. 2 vidíme proměnné magnetické pole Φ a závit tvořený vodičem, na který je připojený galvanometr ukazující naindukované napětí.



Obr. 3: Znázornění vzniku magnetického toku

Cívky jsou umístěny tak, že se skrz ně uzavírá magnetický obvod. Induktorem prochází střídavý proud I_1 a vytváří se proměnný magnetický tok Φ , který prochází závitem tvořeným z vodiče. Na vodič je připojen galvanometr ukazující naindukované napětí U_{ind}

$$U_{ind} = - \omega_Z \frac{d\Phi}{dt} ; \omega_Z = 1 \quad (2)$$

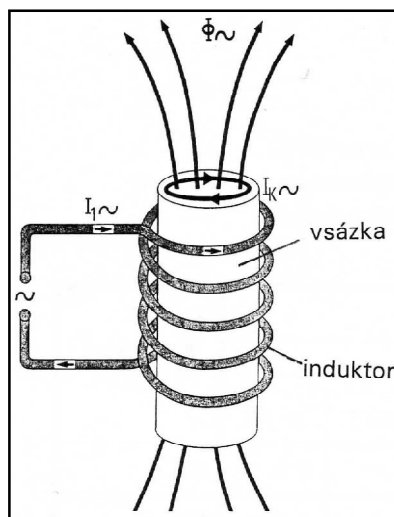
U_{ind} - napětí indukované [V]

ω_Z - počet závitů

$d\Phi$ - celkový magnetický tok, který protéká smyčkou [Wb]

dt - čas [t]

Induktorem protéká střídavý proud I_1 . Ten vytváří magnetický tok Φ proudící jádrem cívky tedy kovovou tyčí (vsázka). V té se indukuje napětí a následně kovovou tyčí začne protékat proud I_K který vsazku začne ohřívat.



Obr. 4: Znázornění vzniku vířivých proudů (vsázka a induktor)

I_k - proud protékající vsázkou [A]

I_1 - proud protékající induktorem [A]

Φ - magnetický tok proudící vsázkou [V_s]

Při každém ohřevu vsázky (tyče) dosahuje vysokých teplot jak induktor tak vsázka, proto se v některých případech na místo klasického vodiče používají vodivé trubky nebo jiné duté vodiče různého profilu a to z důvodu chlazení induktoru.

Na obrázku 5 vidíme, rozžhavenou vsázku, kterou obepíná induktor. Mohlo by tu dojít k poškození vodiče vlivem vysoké teploty, proto se někdy používá jako chladicí medium voda, která proudí induktorem a tak induktor chladí. V praxi je tento indukční ohřev s vodním chlazením často používaným. Indukční ohřev se využívá jak hojně v průmyslu, tak i v domácnostech pro vaření na indukčních varných deskách (sporák).



Obr. 5: Průběh indukčního ohřevu

1.2. Indukované elektromotorické napětí

Umístíme-li uzavřený elektrický obvod do magnetického pole, pak elektrickým obvodem nebude procházet žádný elektrický proud, je-li magnetické pole stacionární, tzn. nemění se s časem a pokud se elektrický obvod nepohybuje. Elektrickým obvodem však začne procházet elektrický proud pokud nastane jedna z následujících situací.

- smyčka se začne pohybovat
- zdroje magnetického pole se začnou pohybovat
- magnetické pole se začne měnit, např. v důsledku změny elektrických proudů, které jsou zdrojem magnetického pole

Uvedené situace mají za následek vytvoření (indukci) elektrického proudu v elektrickém obvodu, ačkoliv k tomuto obvodu nebyl připojen žádný zdroj. Ve všech případech vzniká v elektrickém obvodu proud tím, že na nabitě částice elektrického obvodu začnou působit síly, které je uvedou do pohybu.

Podobně jako při zavedení elektromotorického napětí v nehomogenních vodičích lze pohyb nabitých částic chápat jako důsledek působení určité intenzity E_{Fa}^* a odpovídajícího elektromotorického napětí E_F , které se označuje jako indukované elektromotorické napětí. Indukované elektromotorické napětí může vznikat nejen v nehomogenních vodičích, ale také v homogenních.

Na základě podobnosti s Ohmovým zákonem pro nehomogenní vodiče lze pro indukované elektromotorické napětí psát:

$$E_F(t) = RI(t), \quad (3)$$

kde R je celkový odpor obvodu a $I(t)$ je okamžitá hodnota indukovaného elektrického proudu v čase t .

[1,6,9,14]

2. Fyzikální závislosti indukčního ohřevu

Hloubka vniku

Vsázku je možné ohřívat jak po povrchu tak i do hloubky, to záleží na frekvenci. S rostoucí frekvencí se snižuje hloubka vniku záření. Se snižující hloubkou vniku se zvyšuje také proudová hustota. Hloubka vniku δ [m] lze vypočítat následujícím způsobem:

$$\delta = \sqrt{\frac{2}{\omega \mu \sigma}} \quad (4)$$

$$\omega = 2\pi f \quad (5)$$

δ - hloubka vniku [m]

μ - permeabilita [Vs/Am]

σ - konduktivita [A/Vm]

f - frekvence [Hz]

Například pro konstrukci oceli se pohybuje hloubka vniku při 50 Hz a teplotě 20°C kolem 1 cm a při nárůstu teploty na teplotu kovací t.j. kolem 1200°C se zvětší hloubka vniku asi na 8 cm. Při obvyklém indukčním prohřívání (kromě intenzivního prohřívání povrchu při povrchovém kalení) trvá prohřívání větší počet minut a v této době nastává působením tepelné vodivosti postačující vyrovnání teploty, a tedy i vodivosti γ v celé tloušťce.

V jiných případech uvažujeme střední teplotu stěny (aritmetický střed teplot na obou rozhraních) a k ní vyhledáme odpovídající vodivost. Intenzita magnetického pole má na povrchu indukčně prohřívané stěny maximální hodnotu a ubývá s rostoucí vzdáleností od povrch. Permeabilita μ_r má naopak nejmenší hodnotu na povrchu (velké H), a roste s klesající intenzitou H . Ve většině případu indukčního zahřívání oceli výpočty pro žhavý materiál, nad bodem magnetické přeměny, kdy je $\mu_r = 1$. Tak je tomu u tavících pecí na ocel, u prohřívacích zařízení, atd. Tím se výpočty značně zjednoduší a zpřesní.

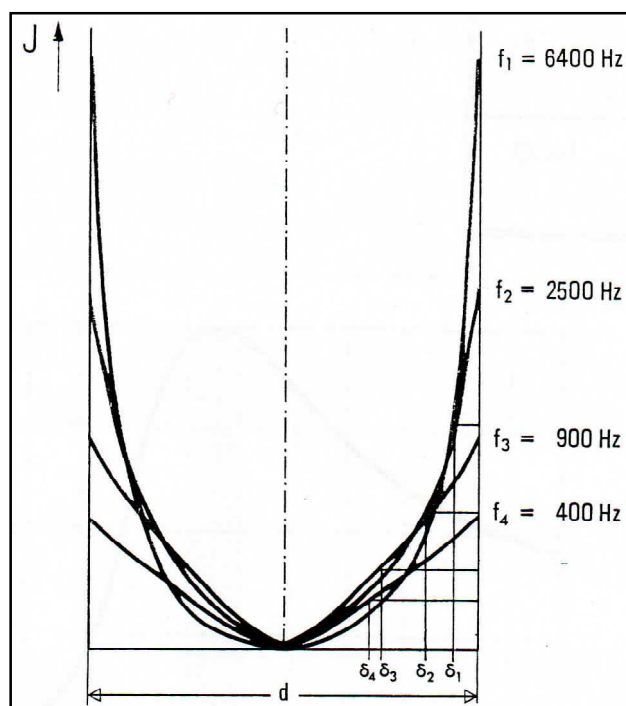
V některých případech, jako je žíhání svarů např. při teplotě 550°C dochází ke změně permeability. Hloubka vniku v závislosti na teplotě a kmitočtu u konstrukční oceli je uvedena v tabulce.

f/θ	20°C	750°C	1000°C	1200°C
50 Hz	4,5	10,5	78	81
2 kHz	0,71	1,67	12,3	12,7
10kHz	0,32	0,74	5,5	5,7

Tab. 1: Hloubka vniku v závislosti na teplotě (θ) a kmitočtu (f) pro konstrukční oceli

f/ϑ	20°C	750°C	1000°C	1200°C
50 Hz	9,5	28,3	31,8	33,5
10 kHz	0,67	6,1	7,1	7,8
1MHz	0,067	0,14	0,22	0,29

Tab. 2: Hloubka vniku v závislosti na teplotě (ϑ) a kmitočtu (f) pro měď



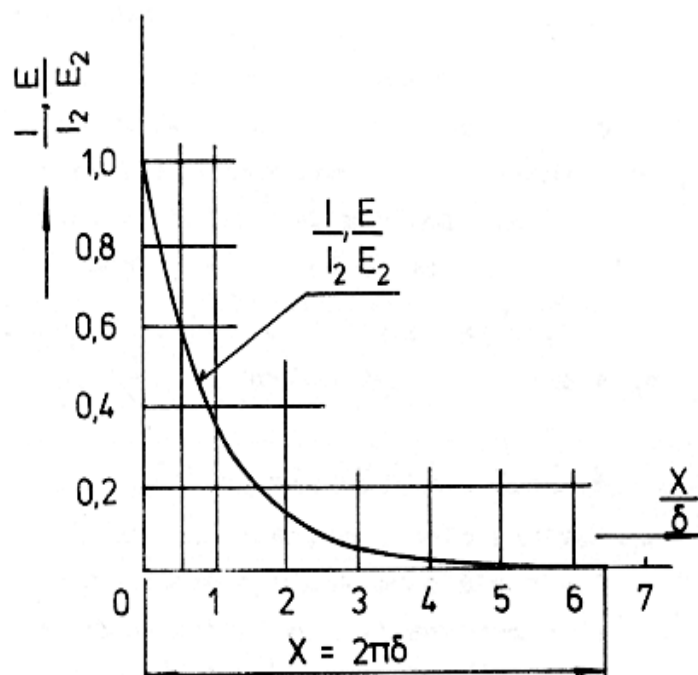
Obr. 6: Graf hloubky vniku v závislosti na frekvenci

Proudová hustota

Exponenciální průběh poměru proudových hustot $I_1/I_2 = E_1/E_2 = e^{-x/\delta}$ je graficky zobrazen na obrázku. Ve vzdálenosti $x = \delta$ od povrchu je proudová hustota utlumena na 36,8 % původní hodnoty I_1 na povrchu. Ve vzdálenosti $x = 2\pi\delta$ je již proudová hustota jen 0,187 % původní hodnoty na povrchu.

To znamená, že vlna, která dopadá na stěnu nekonečné tloušťky je prakticky zcela utlumena, jestliže tloušťka stěny „d“ je minimálně 6,28 krát větší než hodnota hloubky vniku.

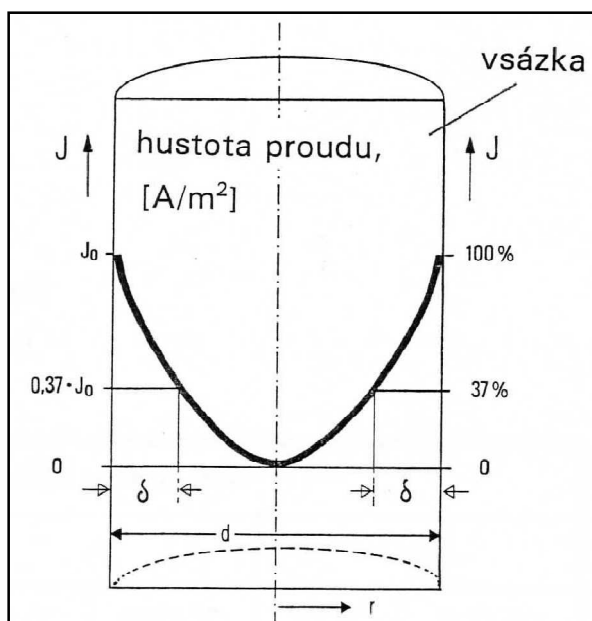
Ve sledované stěně zvolíme hranol, jehož základnou bude plocha 1 x 1 m a výška odpovídající tloušťce, stěny „d“. Základnou pak vniká do hranolu určité množství energie, která buď v něm utlumena a přeměněna v teplo.



Obr. 7: Průběh proudové hustoty při indukčním ohřevu

Povrchový jev

Při povrchovém jevu dochází na povrchu vsázky ke zvětšení proudové hustoty. Díky tomu se vsázka začne ohřívat nejvíce na povrchu a do větší hloubky je teplo šířeno vedením.



Obr. 8: Povrchový jev

Účinnost indukčních pecí:

Elektrotepelná účinnost se vypočítá poměrem užitečného výkonu P_2 přeměněného ve vsázce na teplo ku příkonu P_1 .

$$\eta_{el} = \frac{P_2}{P_1} * 100 \quad (6)$$

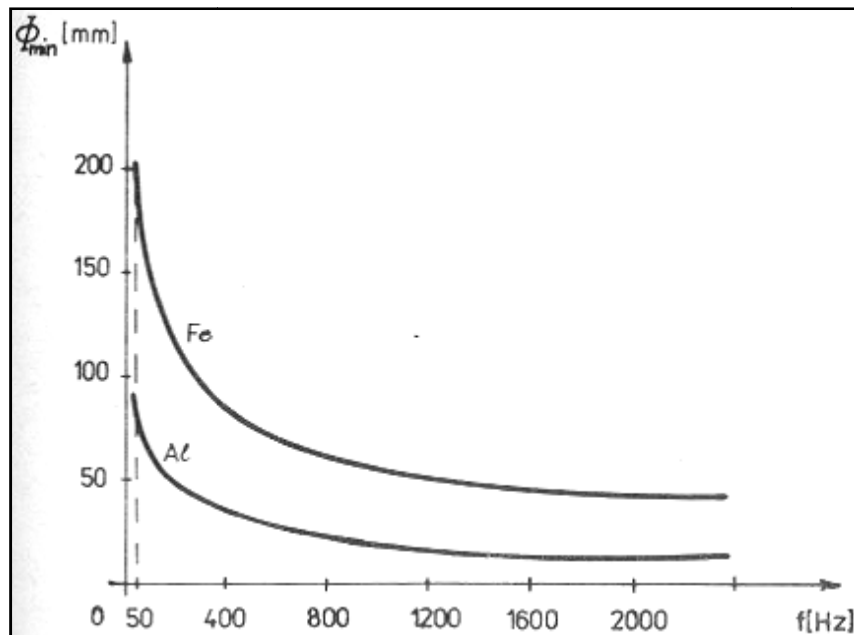
η_{el} - elektrotepelná účinnost [%]

P_2 - užitečný výkon [W]

P_1 - činný výkon [W]

Účinník indukčních pecí

Indukční pece dosahují převážně nízkých hodnot účinníku $\varphi = 0,08 - 0,2$. To je důsledkem velkého rozptylového magnetického toku, který se uzavírá nevodivým kelímkem.



Obr. 9: Závislost účinníku na frekvenci

Účinník indukčních pecí

$$\cos \varphi = \frac{R_1}{Z_1} \quad (7)$$

$$|Z| = \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2} \quad (8)$$

$\cos \varphi$ - účinník [-]

R_1 - elektrický odpor [Ω]

Z_1 - impedance [Ω]

X_L - induktivní reaktance [Ω]

X_C - kapacitní reaktance [Ω]

Elektromagnetické pole obecně

Základní veličiny elektromagnetického pole se skládají z jedné skalární a pěti vektorových veličin, kterými jsou:

ρ - objemová hustota náboje [C/m^3]

J - hustota vodivého proudu [A/m^2]

E - intenzita elektrického pole [V/m]

D - elektrická indukce [C/m^2]

H - intenzita magnetického pole [A/m]

B - magnetická indukce [T]

Základní jednotkou soustavy SI je ampér [A], ostatní jednotky coulomb [C] pro náboj, volt [V] pro napětí, weber [Wb] pro magnetický tok a tesla [T] pro magnetickou indukci, patří mezi odvozené.

Intenzita elektrického pole

Intenzita elektrického pole (též elektrická intenzita) je fyzikální veličina, vyjadřující velikost a směr elektrického pole. Je definována jako elektrická síla působící na těleso s kladným jednotkovým elektrickým nábojem.

Pro velikost intenzity elektrického pole v okolí bodového náboje pak platí:

$$E = \frac{1}{4\pi\epsilon} \frac{Q}{r^2} \quad (9)$$

E - intenzita elektrického pole [V/m]

ϵ - permitivita [F/m]

r - vzdálenost od nabitého tělesa [mm]

Q - elektrický náboj [C]

Magnetická indukce

Magnetická indukce je fyzikální veličina, která vyjadřuje silové účinky magnetického pole na částice s nábojem nebo magnetickým dipólovým momentem. Magnetická indukce je vektorová veličina. Magnetickou indukci si představujeme jako sílu, kterou magnetické pole působí na pohybující se elektrický náboj.

$$B = \frac{F_{max}}{Q_v} \quad (10)$$

B - magnetická indukce [T]

F_{max} - maximální síla kterou působí pole na náboj [N]

Q_v - náboj který se pohybuje rychlostí v [C]

Coulombův zákon vyjadřuje vztah mezi elektrickým nábojem a elektrickou silou.

Mezi dvěma náboji vzniká silové působení. Měřením se zjistilo že síla, kterou se dva bodové náboje ve vakuu odpuzují (souhlasné) nebo přitahují (nesouhlasné), je přímo úměrná součinu jejich velikostí a nepřímo úměrná druhé mocnině jejich vzdálenosti r.

$$F_e = \frac{1}{4\pi\epsilon_0\epsilon_r} \frac{|Q_1| \cdot |Q_2|}{r^2} \quad (11)$$

F_e - elektrická síla [N]

$Q_{1,2}$ - velikost nábojů [C]

r - vzdálenost nábojů [mm]

ϵ_0 - permitivita vakua ($8,854187817 \cdot 10^{-12}$) [F/m]

ϵ_r - relativní permitivita (u vzduchu 1) [F/m]

Intenzita magnetického pole

Magnetické pole v látce nelze vyjádřit pouze pomocí magnetické indukce, ale je nutno započíst také vliv magnetizace. Pro vyjádření magnetického pole v látce se zavádí fyzikální veličina intenzita magnetického pole.

$$H = \frac{1}{\mu_0} B - M = \frac{1}{\mu_0} (B - P_m) \quad (12)$$

H - intenzita magnetického pole [A/m]

μ_0 - permeabilita vakua ($4\pi \cdot 10^{-7}$) [H/m]

B - magnetická indukce [T]

M - magnetizace [T]

P_m - magnetická polarizace [T]

Magnetické vlastnosti látek

Velikost magnetické indukce cívky je závislá na permeabilitě prostředí, v němž se cívka nachází resp. kterým je tvořeno její jádro. Proto je magnetická indukce cívky navinuté na uzavřeném ocelovém jádře větší než magnetická indukce téže cívky bez jádra. Hodnota relativní permeability je určena vlastnostmi atomů, z nichž je látka složena.

Zjednodušený model vypadá takto: elektrony v atomech vytvářejí elementární magnetická pole, která se skládají a vytvářejí výsledné magnetické pole atomu. Podle uspořádání elektronů v atomu dělíme magnetické látky do tří skupin:

Diamagnetické látky se skládají z diamagnetických atomů a mají relativní permeabilitu nepatrně menší než 1, ($\mu_r < 1$). To znamená, že tyto látky mírně zeslabují magnetické pole (patří sem inertní plyny, zlato, měď, rtuť, atd.). Diamagnetická látka se od magnetu odpuzuje.

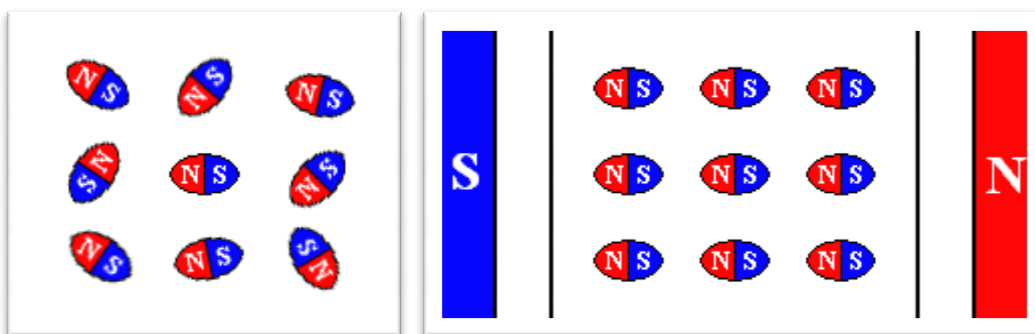
Paramagnetické látky jsou složeny z paramagnetických atomů a jejich permeabilita je nepatrně větší než 1, ($\mu_r > 1$). Tyto látky mírně zesilují magnetické pole (draslík, sodík, hliník, ...). Atomy těchto látek mají vlastní magnetické pole. Vnější magnetickým polem by tedy bylo možné je uspořádat tak, aby došlo k souhlasné orientaci magnetických polí jednotlivých atomů, a tím i ke značnému zesílení magnetického pole v látce. Ve skutečnosti tento stav nenastává - brání mu tepelný pohyb. Magnetické pole v paramagnetické látce není možné zesílit ani vnějším polem o velké magnetické indukci.

Paramagnetická látka se k magnetu přitahuje a bude sama přitahovat drobné kovové předměty (kancelářské svorky, ...) pouze v případě, že bude v blízkosti magnetu. Paramagnetickou látku není možné zmagnetovat trvale.

Feromagnetické látky jsou složeny také z paramagnetických atomů, ale v takovém uspořádání, že výrazně zesilují magnetické pole. Jejich relativní permeabilita je mnohem větší než 1 ($\mu_r \gg 1$). Již slabým magnetickým polem lze u nich vyvolat takové uspořádání atomů, že se magnetické pole zesílí a dojde k magnetování látky. Magnetické pole ve feromagnetické látce zůstává, i když vnější pole zanikne.

Příčinou magnetizace látky je působení tzv. výměnných sil mezi sousedními atomy. Jejich vlivem nastává i bez vnějšího magnetického pole souhlasné uspořádání magnetických polí v malé oblasti látky. Při této spontánní (samovolné) magnetizaci vznikají v látce zmagetované mikroskopické oblasti (o objemu 10^{-3} - 10 mm^3) zvané magnetické domény, které jsou orientovány nahodile (viz obr. 10). Působením vnějšího magnetického pole se tyto domény orientují souhlasně a látka získává vlastnosti magnetu (viz obr. 11). Při tomto ději se objem domén postupně zvětšuje, až při jejich souhlasném uspořádání doménová struktura mizí - látka je magneticky nasycena.

Feromagnetickou látku lze zmagetovat trvale: např. přejedeme-li magnetem nůž nebo šroubovák, začne přitahovat drobné kovové předměty (kancelářské svorky, šroubky, atd.). Feromagnetická látka je tvořena tímž druhem atomů jako látka paramagnetická, liší se ale v jiném uspořádání atomů a tedy i v jiném vzájemném silovém působení.



Obr. 10: Struktura paramagnetické látky Obr. 11: Struktura feromagnetické látky

Strukturu paramagnetické látky lze přiblížit na obr. 10. Zmagetované oblasti jsou ale v paramagnetické látce výrazně menší než v látce feromagnetické - v látce paramagnetické se jedná pouze o jednotlivé atomy, zatímco v látce feromagnetické jde o „shluky“ atomů. Navíc tyto oblasti není možné v paramagnetické látce uspořádat ve směru vnějšího magnetického pole (jako u látky feromagnetické - viz obr. 11); tomuto uspořádání brání tepelný chaotický pohyb částic látky!

Základní vlastnosti feromagnetických látek:

1. Feromagnetismus se projevuje jen tehdy, je-li látka v krystalickém stavu - v kapalném nebo plynném stavu se chovají jako látky paramagnetické. Feromagnetismus je tedy vlastností struktury, ne jednotlivých atomů.
2. Pro každou feromagnetickou látku existuje určitá teplota (tzv. **Curieova teplota**), při jejímž překročení látka ztrácí feromagnetické vlastnosti a stává se látkou paramagnetickou. Po překročení Curieovy teploty (řádově stovky stupňů Celsia) je tepelný pohyb tak intenzivní, že se vzniklé magnetické domény rozpadají zpět na jednotlivé atomy.

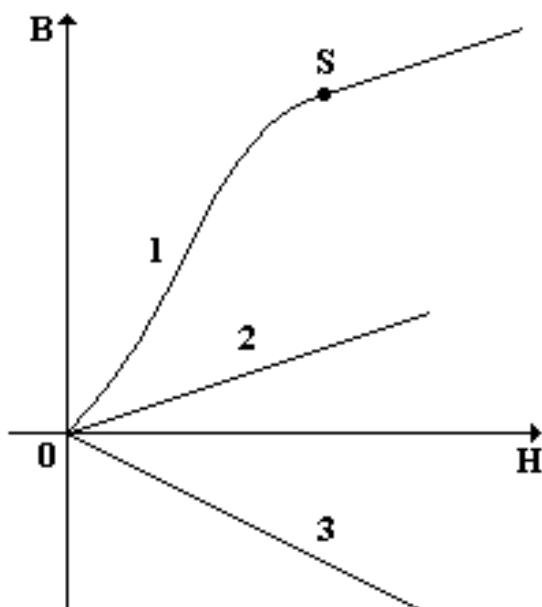
Chcete-li tedy zničit magnetické vlastnosti magnetu vystavte jej vysoké teplotě. Necháte-li jej chladnout bez přítomnosti magnetického pole, získáte kus nemagnetického materiálu. Zahřejete-li jej ovšem znovu na Curieovu teplotu a necháte-li jej poté chladnout v magnetickém poli, získáte opět magnet.

Vzniku domén totiž brání vnitřní tepelný pohyb částic. Proto se tyto domény snáze vytvoří v přítomnosti vnějšího magnetického pole. Před opětovným vytvořením magnetických domén je nutný ohřev na Curieovu teplotu proto, aby se intenzivním tepelným pohybem rozpadly zbytky magnetických domén, které mohly ve struktuře látky zůstat z předchozího magnetování. Bez ohřevu na Curieovu teplotu by bylo nutné použít velmi silné vnější magnetické pole.

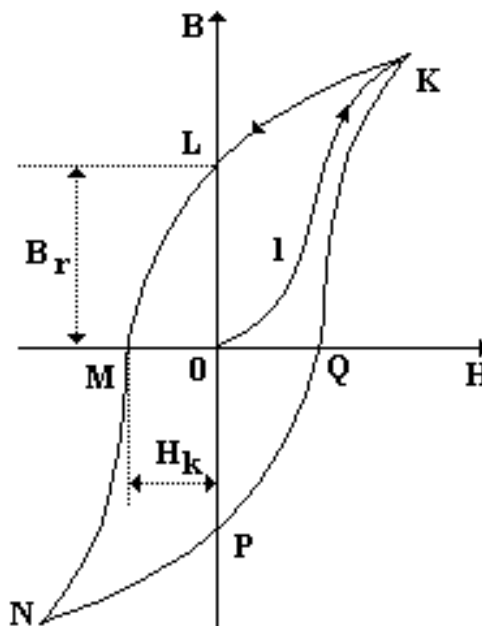
K natočení domén je nutno dodat určitou energii, je nutné vykonat určitou práci. A tuto energii je možné získat ohřevem materiálu (částice i domény začnou intenzivněji vibrovat a je tedy snadnější je překloupat do žádané polohy) a nebo silným magnetickým polem (magnetická síla se bude snažit domény natočit tak, aby byly v energeticky výhodném stavu).

Magnetická hystereze

Základem každé hysterezní smyčky je křivka prvotní magnetizace (panenská křivka), která je zobrazená na obr. 12 část 1. Bod *S* na této křivce odpovídá magnetickému nasycení látky. To je stav v němž jsou magnetické domény paralelně uspořádány ve směru \vec{H} . Další zvětšování magnetické indukce za bod *S* je způsobeno zvětšováním magnetické indukce pole samotné cívky (tj. už se neuplatní vliv feromagnetického jádra) - viz obr. 12 křivka 2. Křivka 3 na tomtéž obrázku charakterizuje diamagnetickou látku.



Obr. 12



Obr. 13

Při zmenšování velikosti intenzity magnetického pole (tedy při zmenšování proudu tekoucího cívkou) se zmenšuje i velikost magnetické indukce. Grafem závislosti je křivka KL , která vypovídá o nevratnosti magnetizačních procesů ve feromagnetických látkách. Celý graf je zakreslen na obr. 13.

Po dosažení nulové hodnoty intenzity magnetického pole neklesne velikost magnetické indukce na nulovou hodnotu, ale na hodnotu B_r . Látka je tedy zmagnetována i bez působení vnějšího magnetického pole. Magnetická indukce \vec{B}_r se nazývá remanentní (zbytková) magnetická indukce.

Změníme-li směr vektoru intenzity magnetického pole na opačný (tj. obrátíme-li směr proudu v cívkě), bude se s dalším zvětšováním proudu tekoucího cívkou (tedy i velikosti magnetické intenzity) zmenšovat velikost magnetické indukce (část křivky LM).

Dosáhne-li velikost intenzity magnetického pole hodnoty H_k (tzv. koercitivní intenzita magnetického pole), klesne velikost magnetické indukce v látce na nulu (bod M). Při dalším zvětšování intenzity magnetického pole (a tedy i proudu procházejícího cívkou) se vzorek magnetuje opačně až do nasycení (bod N). Poté začneme intenzitu magnetického pole opět zmenšovat a po dosažení její nulové velikosti změníme opět směr proudu v cívkě a dojdeme do bodu K (část křivky $NPQK$). Tím je jeden magnetizační cyklus uzavřen.

Popsaný jev se nazývá magnetická hysterese a křivka $KLMNPQK$ hysterezní smyčka.

Hysterezní smyčka je důležitou charakteristikou feromagnetických látek - dají se z ní určit hodnoty B_r a H_k , je možné odhadnout tzv. hysterezní ztráty, které jsou příčinou nežádoucího zahřívání feromagnetických látek při jejich střídavém magnetování (zahřívání ocelových jader transformátorů), hysterezní ztráty jsou přitom přímo úměrné obsahu plochy ohraničené hysterezní smyčkou.

Podle tvaru křivky dělíme látky na:

1. magneticky tvrdé - mají širokou hysterezní smyčku, velkou hodnotu B_r a jsou tedy více odolnější vůči zmagnetování (ocel s velkým obsahem uhlíku, ...). Po zrušení vnějšího magnetického pole, zůstávají nadále zmagnetovány a chovají se jako permanentní magnet. Jejich magnetické pole lze zrušit pomocí vnějšího magnetického pole opačné polarity (např. do cívky s jádrem zavedeme proud opačného směru).
2. magneticky měkké - materiály s úzkou hysterezní smyčkou, které se dají snadno zmagnetovat (magnetofonové pásky, diskety). Mají malou hodnotu B_r , což znamená, že po zrušení vnějšího magnetického pole jejich vlastní magnetické pole prakticky zaniká.

[1,2,3,4,6,7,10,15]

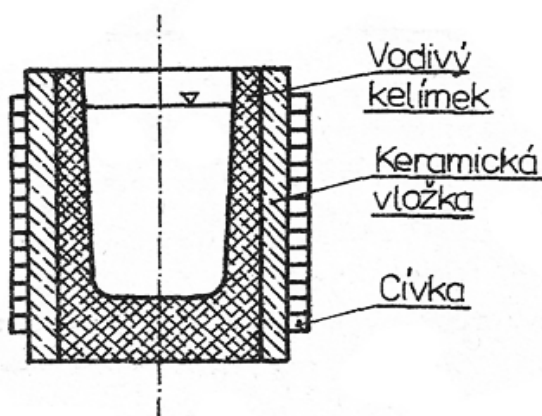
3. Indukční pece

3.1. Rozdělení indukčních pecí podle konstrukce

3.1.1. Indukční kelímková pec s vodivým kelímkem

Indukční pec s nevodivým kelímkem má nízkou elektrickou účinnost při tavení dobře vodivých materiálů, jako jsou měď a její slitiny, hliník a jeho slitiny apod. Elektrická účinnost podstatně stoupne, jestliže pec opatříme vodivým kelímkem schematicky podle obr. 14 (pro tavení Al a Cu). Jedná-li se o nižší teploty, jaké přicházejí v úvahu při tavení hliníku s jeho slitin, zhotovuje se kelímek z ocelolitiny.

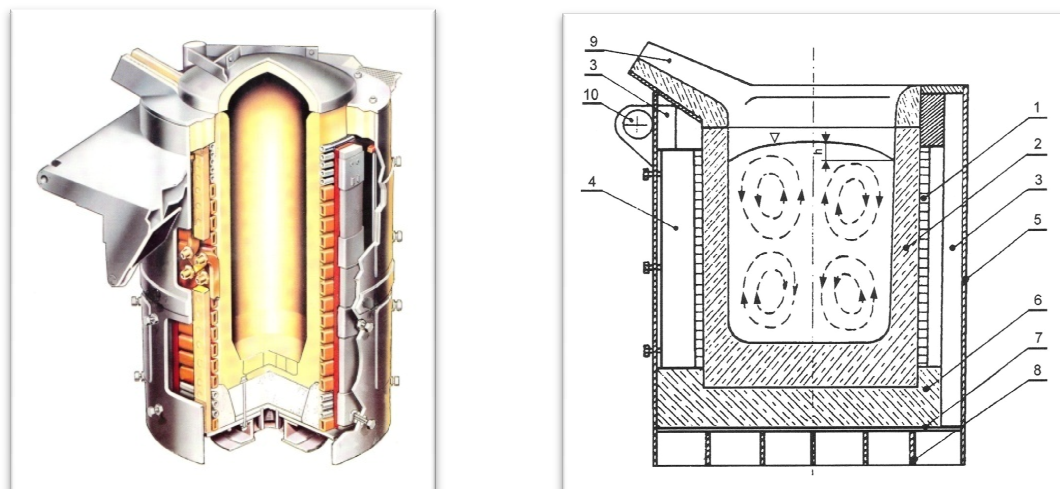
Pro vyšší teploty se používají tzv. grafitové kelímky. Zhotovují se ze směsi šamotu a grafitu. Čím více grafitu, tím je kelímek vodivější. Velká vodivost však není žádoucí. Mezi kelímkem a cívkou je keramická izolační vrstva, která zmenšuje ztrátový tepelný tok ze žhavého kelímku do vodou chlazení cívky. Zavedeme-li do cívky proud, dopadá elektromagnetické vlnění vyzářené vnitřním povrchem cívky na vnější povrch vodivého kelímku, vstupuje do jeho stěny, indukuje proud ve stěně a jeho průchodem se kelímek zahřívá. Ten potom předává teplo vsázce, vložené do jeho dutiny. Poměry obvykle jsou takové, že ve stěně kelímku se přemění v teplo větší část dopadající elektromagnetické energie, menší část však projde stěnou a zahřívá přímo vsázku.



Obr. 14: Indukční kelímková pec s vodivým kelímkem

Rozhodující je vzájemný poměr mezi tloušťkou stěny δ_3 , a hloubkou vniku a_3 . Je-li hloubka vniku malá proti tloušťce stěny pohltí se všechna elektromagnetická energie ve stěně kelímku. Výpočet je stejný jako pro dva sousední válce u pece s nevodivým kelímkem. Při výpočtu považujeme kelímek za vsázku. Není-li však $a_3 \ll \delta_3$ projde značná část elektromagnetické energie stěnou kelímku do vsázky. Teoreticky je tento případ značně komplikovaný.

3.1.2. Indukční kelímková pec s nevodivým kelímkem



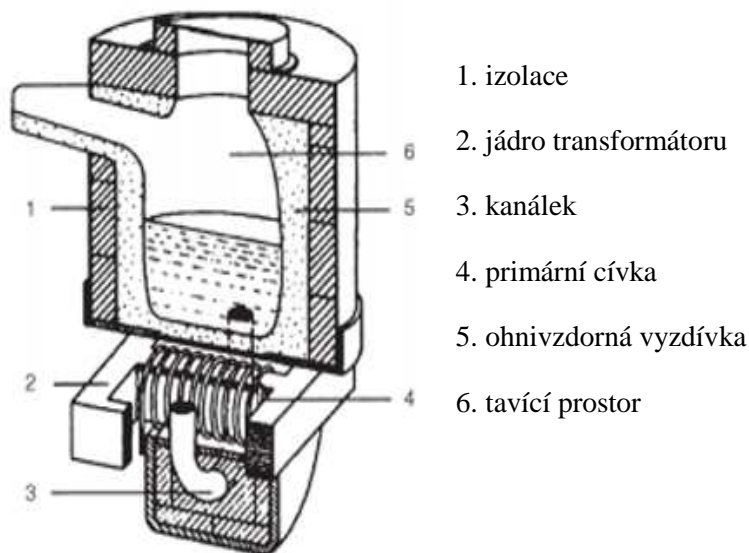
Obr. 15: Indukční kelímková pec s nevodivým kelímkem

1. Kruhová ohřívací cívka
 - Cívka je navinuta jako jednovrstvová, nejčastěji dutým měděným vodičem čtyřhranného průřezu
 - Dutinou vodiče protéká chladicí voda
2. Keramický zadusáný kelímk pecce
 - Nejčastěji z křemičitého písku
3. Svazky transformátorových plechů
 - Jsou svisle uspořádány po celém vnitřním obvodu pláště pece (5)
 - Tyto svazky svádějí magnetický tok vně cívky, aby nezabíhal do pláště (5) a do dalších konstrukčních částí pece
4. Střední azbestocementové trámce pro cívku
5. Ocelový plášť pece
6. Cihlová keramická vyzdívka na dně pece
7. Stínící měděný plech zabráňující vniknutí magnetického toku cívky do mřížového dna pece
8. Mřížové dno pece
9. Hubice pece pro odlévání
10. Osa, kolem které se pec otáčí při vyklápění, odpichu

3.1.3. Indukční kanálková pec

Na obr. 16 je kanálková pec, určená pro tavení neželezných kovů. Tavenina je v kotlíku s ohnivzdornou vyzdívkou. Pod kotlíkem je uložena primární indukční cívka, navinutá na feromagnetickém jádru. Induktor z ohnivzdorného materiálu je tvořen jedním nebo několika kanálky, které jsou vyústěny do taveniny. Roztavený kov uvnitř kanálků tvoří sekundární závit nakrátko a působením elektromagnetických sil proudí z kanálků do taveniny, takže vsázka je intenzivně promísena. Velké kanálkové pece se používají zejména v průmyslu na zpracování hliníku. Jejich předností je dobrá celková účinnost (zhruba 85 %) a malé ztráty propalem (pod 1 %).

V současnosti se nejvíce používají indukční kanálkové pece s uzavřeným svislým a šikmým žlábkem, resp. indukční kanálkové pece s vyměnitelnou induktorovou jednotkou.



Obr. 16: Indukční kanálková pec

Indukční kanálková pec je transformátor s uzavřeným železným jádrem, s primární cívkou připojenou na síť. Kanálek vyplněný roztaveným kovem je sekundární strana transformátoru.

Indukční kanálková pece se používá na tavení barevných kovů, zejména mědi hliníku a jejích slitin, případně k ohřívání litiny roztavené předtím. Při zvyšování příkonu do pece s odkrytým kanálkem dochází nežádoucímu účinku ve vsázce, tzv. „uskřipovací jev“.

Vlivem elektrodynamických sil působících v radiálních rovinách všemi směry kolmo k povrchu tekutého vodiče dojde k přerušení souvislého prstence roztaveného kovu. V tom okamžiku však skončí elektrodynamické působení, prstenec se znovu spojí a jev se opakuje. Vznikají rázy, které znemožňují řádný provoz pece. Částečně se tomuto jevu čelilo vhodnou konstrukcí pecní cívky. Ještě vhodnější se však ukázalo řešení se zakrytým kanálkem zapuštěným do dně pece.

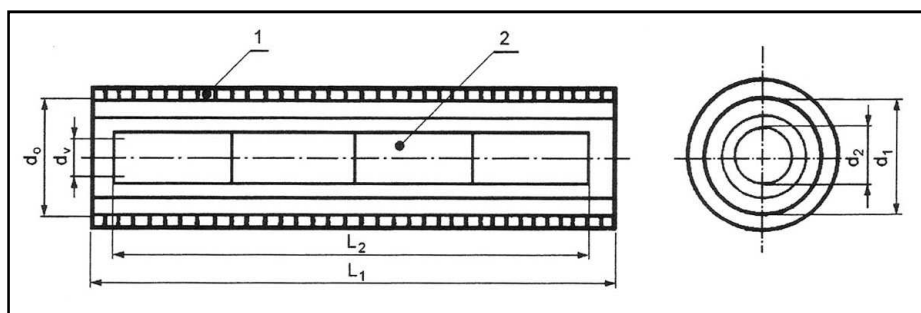
Hydrostatický tlak roztaveného kovu do značné míry zabraňuje vzniku uskřipovacího jevu. Při odlévání se v peci ponechá asi třetina vsázky, zaplňující kanálek a dno pece, aby se po zapnutí transformátoru v uzavřeném závitu mohlo vyvíjet teplo. Pec se potom naplní vsázkou, která se taví ponořením do přehřáté lázně u dna pece. U těchto pecí vzniká teplo pouze ve vsázce nalézající se v kanálku. Působením elektrodynamického tlaku je kov z kanálku plynule vytlačován do nístěje a chladnější kov z nístěje vtéká do kanálku. Tím se přenáší teplo z kanálku do celé vsázky v nístěji.

3.1.4. Indukční prohřívací zařízení

V závodech, kde se zhotovují součásti kováním nebo lisováním za horka, je důležitým problémem rovnoměrné prohřátí materiálu. Kovové vývalky válcového nebo čtyřhranného tvaru - nejčastěji ocelové - je třeba ohřát na kovací teplotu (ocel 1 150° - 1 250°). Ve starších kovárnách se k prohřívání vývalků používá pecí palivových, vytápěných plynem, práškovým uhlím nebo naftou.

Rovnoměrné prohřátí v celém průřezu však trvá příliš dlouho a během této doby dochází na povrchu k oxidaci materiálu. Několik procent materiálu se zničí a mimoto vzniklé okraje poškozují při další operaci zápusťky a zkracují jejich životnost. Naproti tomu prohřívání v indukční peci trvá velmi krátkou dobu, takže prakticky nenastává oxidace na povrchu.

Ekonomické výhody jsou příčinou rychlého zavádění indukčního prohřívání do nově budovaných kováren. Indukční pec (indukční ohřívačka) na vývalky má obvykle válcový tvar, schematicky podle obr. 17.



Obr. 17: Indukční prohřívací zařízení

Volba kmitočtu a doby prohřívání

Rovnoměrné prohřátí nastane tak, že se teplo z povrchové vrstvy, kde vzniká, šíří vedením do nitra vývalku. Z tohoto hlediska je výhodnější, aby vrstva, ve které se teplo vyvíjí, nebyla příliš slabá, což jinými slovy znamená, že kmitočet nesmí být příliš vysoký. Je proto třeba zvolit vhodný kmitočet a tím i vrstvu, ve které se teplo vyvíjí tak, aby nastalo absorbování energie s dobrou účinností, avšak aby nedocházelo k přehřívání povrchu. Za optimální lze označit takový kmitočet, při kterém je přibližně $r_2 = (2,5 - 3,0) a_2$. Bereme hloubku vniku pro materiál již prohřátý, tj. magnetický, jde-li o ocel. V praxi se volí kmitočet pro indukční prohřívání oceli v závislosti na průměru vývalků podle tabulky.

f [Hz]	50	500	1 000	2 000	4 000	8 000	10 000
d [mm]	160+500	80+280	50+180	35+120	22+70	15+50	5+15

Tab. 3: Závislost frekvence na hloubce ohřevu

Indukční povrchový ohřev

Pro povrchové prohřívání předmětů používáme vysoké frekvence, řádově 10^4 až 10^6 Hz. Hloubka prohřáté vrstvy závisí na frekvenci podle následující tabulky

Frekvence f [kHz]	Hloubka vniku d [mm]	Hloubka ohřáté vrstvy d [mm]
10	5,00	10 - 15
100	1,60	3,5 - 5
1 000	0,50	1 - 1,5
10 000	0,16	0,3 - 0,5
30 000	0,09	0,2 - 0,3
100 000	0,05	0,1 - 0,1

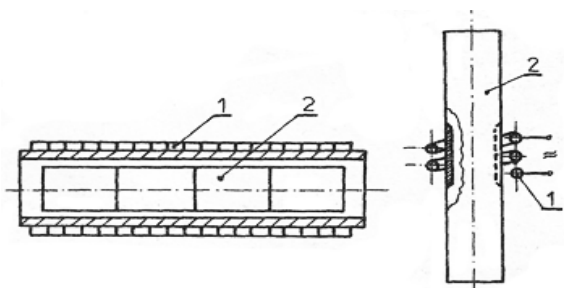
Tab. 4: Závislost frekvence na hloubce vniku a hloubce ohřevu

V průmyslu se používají indukční prohřívací zařízení, induktory, k těmto technologickým účelům:

- Kalení
- Pájení
- Svařování
- Žíhání

3.1.5. Kalení

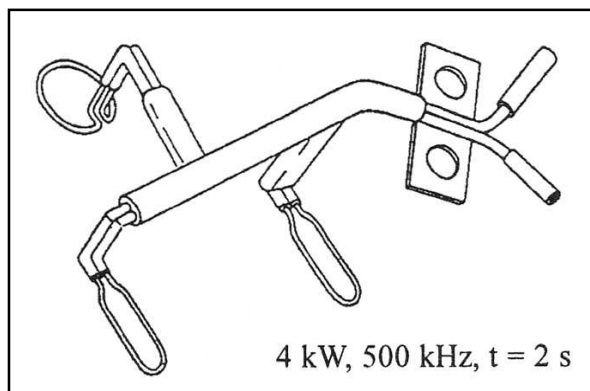
Obr. 18. znázorňuje kovový válec, na kterém má být povrchově zakalena část povrchu, tyč zasuneme do souosé cívky napájené vf proudem, jejíž délka odpovídá šířce pruhu, který má být na povrchu válce zakalen. Při vhodně zvoleném vysokém kmitočtu a poměrně značně vysokém měrném příkonu, který naindukujeme z cívky do povrchu válce, dojde k zahřátí tenké povrchové vrstvy v krátké době. Po dosažení potřebné teploty vypneme vf příkon a do cívky zavedeme chladicí vodu, která stříká dírkami na vnitřním povrchu cívky na prohřátý povrch válce.



Obr. 18: Povrchový válec

3.1.6. Pájení

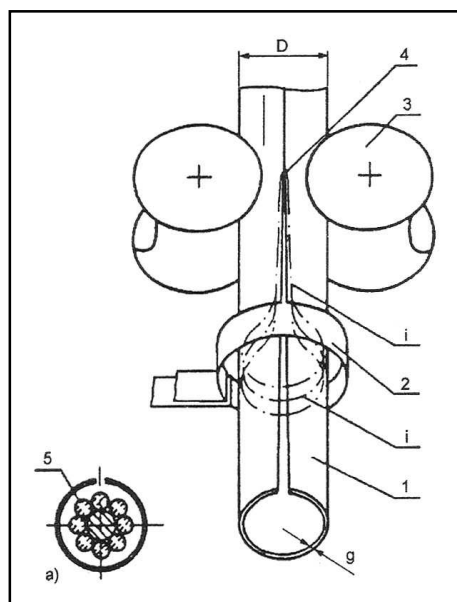
Při pájení používáme frekvenci v rozmezí 2 kHz - 2,5 MHz. Při pájení na měkko se využívá teploty v rozsahu 150 - 150 °C s výkony 0,5 - 5 kW a u pájení na tvrdo teploty v rozmezí 450 - 1050 °C s výkony 3 - 30 kW.



Obr. 19: Speciální induktor pro pájení tří různých tvarů současně

3.1.7. Svařování

Svařování trubek probíhá díky posunujícímu se induktoru. Podle hloubky prohřátí se používají zdroje o frekvenci 8 až 500 kHz a výkonu 50 až 700 kW.



- 1. Trubka
 - 2. Induktor
 - 3. Kladky
 - 4. Svar
 - 5. Magnetické jádro
- i - Indukovaný proud
 $v = 15 - 100 \text{ m/min}$
 $f = 8 - 500 \text{ kHz}$
 $P = 50 - 700 \text{ kW}$
 $g = 0,4 - 12 \text{ mm}$
 $D = 8-500 \text{ mm}$

Obr. 20: svařování s posuvným induktorem

3.1.8. Žihání

Žihání je druh tepelného zpracování slitin. Cílem bývá změna mechanických vlastností, většinou pevnost, kujnosti a obrobitelnost a v neposlední řadě snižuje vnitřní pnutí. Hodně se používá pro spojení oceli a litiny. Teplota žihání se liší dle typu a požadovaných vlastností materiálu. U ocelových součástí se ohřejí na teplotu 700 °C (u mosazi až 800 °C, niklu 960 °C až 1200 °C), dvě hodiny setrvávají na této teplotě a potom pomalu chladnou. Pro zvlášť měkké žihání oceli je teplota ohřevu 1000 °C, u slitin mědi 600 °C s rychlým ochlazením. Lesklé žihání se provádí v řízené atmosféře, nedochází k oxidaci a oduhličení povrchu ocelových součástí.

3.2. Rozdělení indukčních pecí podle frekvence

Na indukční zahřívání způsobené vířivými proudy a hysterezními ztrátami ve stř. mag. poli se užívá nejrozumnějších kmitočtů. Které dělíme na kmitočet sítě 50 Hz, nízké kmitočty do 500 Hz, střední kmitočty od 500 do 10 000 Hz a na vysoké kmitočty nad 10 kHz. Proudů nf a sf se vyrábějí většinou alternátory, proudy vf elektronkovými generátory. Ve vf poli se předměty ohřívají jen při povrchu, v poli nf a sf se předměty zahřívají i do hloubky, takže se jich užívá i na prohřátí předmětů.

Indukční pece dělíme podle pracovní frekvence na:

3.2.1. Kmitočet sítě

Jsou buď s kanálky nebo s kelímky. Obojích se stále více používá hlavně na tavení neželezných kovů s licími teplotami 1450 °C a na výrobu jemnozrnné šedé litiny a jakostní ocelolitiny. Mají velkou účinnost a připojují se k síti jen přes regulační transformátor.

3.2.2. Nízkofrekvenční

S kmitočtem do 500Hz, kde pec má železné jádro. Jde o transformátor se závitem nakrátko, který je proveden jako kanálek ze šamotu. Proudů se indukují do vsázky. Pece se železným jádrem se používají hlavně k tavení neželezných kovů, ale i k tavení litiny a ocele. Pece se nehodí pro přerušovaný chod a pro výrobu speciálních slitin s měnícím se složením.

3.2.3. Středofrekvenční

S kmitočtem 500 až 10 000 Hz, pec je bez železného jádra. Vsázkou jsou železné i neželezné kovy které se zahřívají vířivými proudy a u železné vsázky navíc ještě hysterezními ztrátami.

3.2.4. Vysokofrekvenční

S kmitočtem nad 10 kHz. Tyto pece bývají kelímkové na tavení ocelí a barevných kovů nebo válcové k prohřívání kovových částic. Jejich podstatnou částí je cívka, vinutá z obvykle z profilové měděné trubky, kterou protéká chladicí medium nejčastěji voda. Do dutiny cívky, napájené proudem zvýšeného kmitočtu, se vkládá vsázka z el. vodivého materiálu. V ní se indukují vířivé proudy, jimiž se vsázka zahřívá.

Pec je vlastně transformátor, jehož cívka je I a vsázka II a současně zatížením, spojeným nakrátko. Zdrojem proudu zvýšeného kmitočtu pro tyto pece bývají zpravidla jednofázové alternátory homopolární nebo heteropolární, poháněné motory ze sítě. V poslední době se zavádějí i měniče iontové. Proud v cívce mívá účinník 0,05 – 0,30.

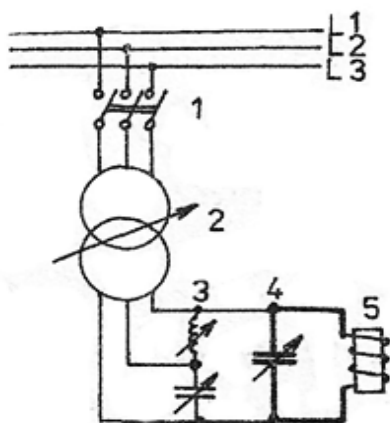
Aby nebyl alternátor zatížen jalovým proudem připojují se k cívce paralelně kondenzátory. Hustota indukovaných proudů do kovového předmětu ubývá se vzdáleností od povrchu. Hloubku, v níž se vyvíjí 86,4% tepla, nazýváme hloubka vniku.

[4,6,7,11,13]

3.3. Zdroje pro napájení indukčních ohřívacích zařízení

3.3.1. Napájení ze sítě 3 x 400/230 V, 50 Hz

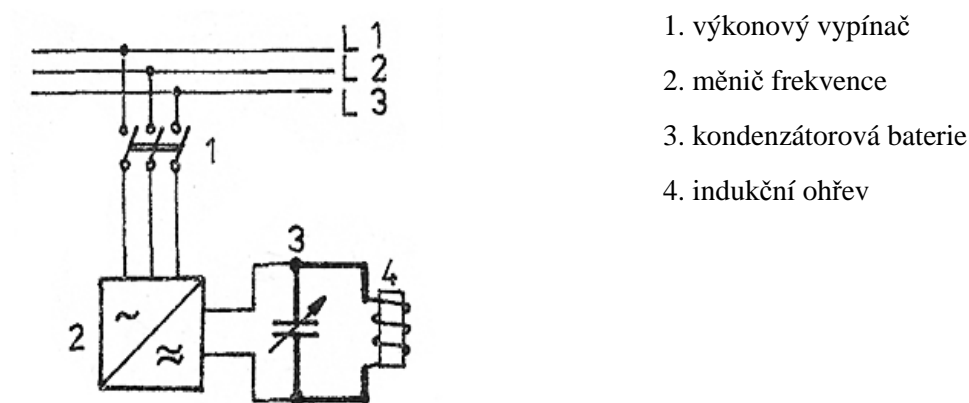
V některých případech se indukční kelímkové pece napájejí proudem s kmitočtem 50 Hz, obdobně se připojují k síti 50 Hz i indukční ohříváčky, jedná-li se o prohřívání válcových těles větších průměrů, u oceli jsou to průměry v rozsahu 160 až 500 mm. Aby nedošlo k poškození cívky horkem chrání se vloženou tepelnou izolací. Jelikož ocel při 785 °C ztrácí permeabilitu, lze ocel bez zesílení proudu zahřívat jen asi do 750°C.



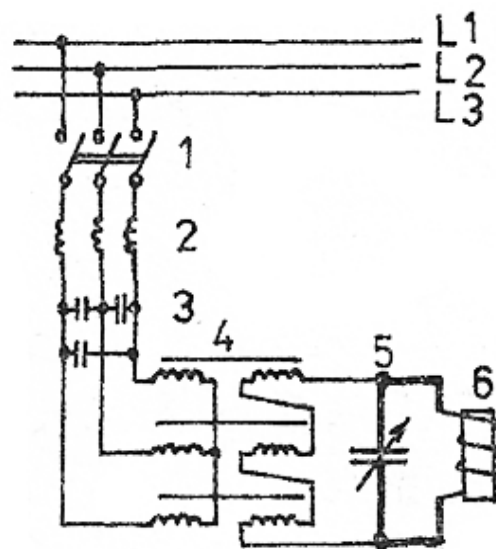
Obr. 21: Princip zapojení elektrických obvodů

1. výkonový spínač
2. regulační transformátor
3. symetrizační obvod převádějící jedno-fázovou zátěž na zátěž trojfázovou symetrickou
4. regulační kondenzátorová baterie kompenzující jalový výkon ohřívací cívky
5. indukční ohřev

3.3.2. Středofrekvenční zdroje napájení



Obr. 22: Princip zapojení středofrekvenčního zdroje



Obr. 23: Princip zapojení trojnásobiče frekvence

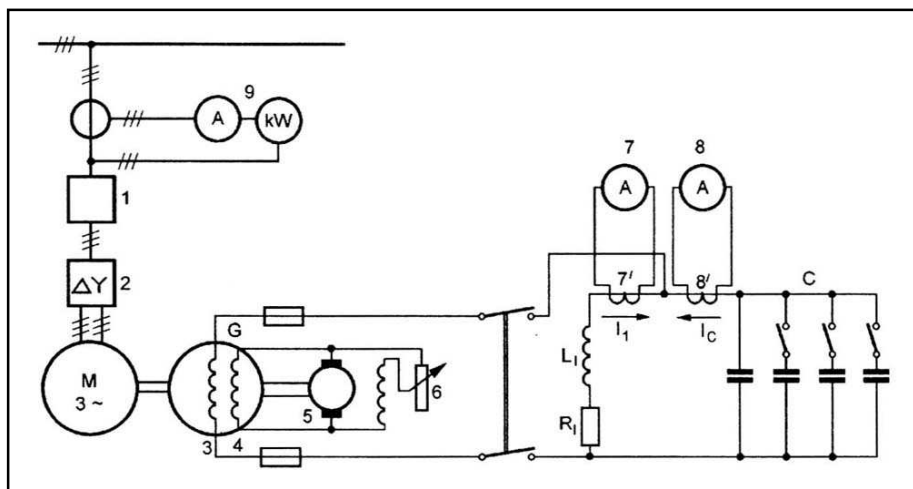
1. výkonový vypínači
2. tlumivky pro snížení pronikání vyšších harmonických do sítě
3. kondenzátory pro kompenzaci jalového proudu transformátoru 4 a pro zkratování vyšších harmonických
4. transformátor se silně přesyceným železným jádrem, se spojením hvězda-otevřený trojúhelník 6, z něhož se odebírá proud s frekvencí 150 Hz
5. regulovatelná kondenzátorová baterie pro kompenzaci
6. indukční ohřev

3.3.3. Rotační středofrekvenční generator

V rotačních generátorech se vyrábějí proudy v rozmezí kmitočtů asi 500 Hz až 10 MHz, stator těchto strojů má na vnitřním povrchu dva druhy drážek. V menších drážkách je uloženo pracovní vinutí, ve kterém vznikají proudy zvýšených kmitočtů. Jako vodiče se používají lanka, zhotovená z většího počtu měděných drátů se smaltovanou izolací. Stator má dále větší drážky, do kterých je vloženo budící vinutí, napájené stejnosměrným proudem. Budící vinutí je provedeno dvoupólové, čtyř nebo šestipólové. Rotor generátoru nemá vinutí, je kovaný z ocelolitiny a má na povrchu věnec s drážkami, zhotovený z tenkých plechů. Tento typ generátoru se označuje jako "heteropolární", což značí, že při pohledu proti ose generátoru vidíme na statoru prostřídání severní a jižní póly budícího vinutí.

Rotační generátory jsou poháněny obvykle asynchronním elektromotorem s kotvou nakrátko nebo kotvou kroužkovou, připojeným k třífázové síti. U starších provedení byl obvykle samostatný generátor spojen pružnou spojkou s elektromotorem běžného provedení. Takové soustrojí však zabírá hodně místa.

Rotačním generátorem je třeba dodávat stejnosměrný proud pro buzení. U větších starších soustrojí byl obvykle na společné hřídeli generátoru a motoru namontován rotační budič. U novějších zařízení se používá usměrňovačů s výbojkami nebo usměrňovačů s polovodiči, připojených k síti.



Obr. 24: Elektrické schéma indukční pece, napájené rotačním měničem

Proud ze sítě jde přes olejový vypínač 1. a přes přepínač hvězda-trojúhelník do asynchronního motoru M s kotvou nakrátko. Motor M je spojen pružnou spojkou s rotačním heteropolárním generátorem C. Generátor má budící vinutí 4. a pracovní vinutí 3. Budící proud dodává rotační budič 5. S derivačním regulátorem 6. Tímto regulátorem se mění podle potřeby budící proud, a tím i napětí, naindukované do pracovního vinutí 3. Současně se tím mění i výkon, který generátor G dodává do pecního vyladěného obvodu, který se skládá z pecní cívky s výslednými hodnotami L, R a paralelně připojené kondenzátorové baterie C. Baterie má pevnou část a další odpínatelné sekce různých velikostí. Ampérmetry 7. a 8. měří přes měniče 7' a 8' proudy I_1 v cívce a I_c v kondenzátorové baterii. Při vyladění jsou tyto proudy prakticky stejné.

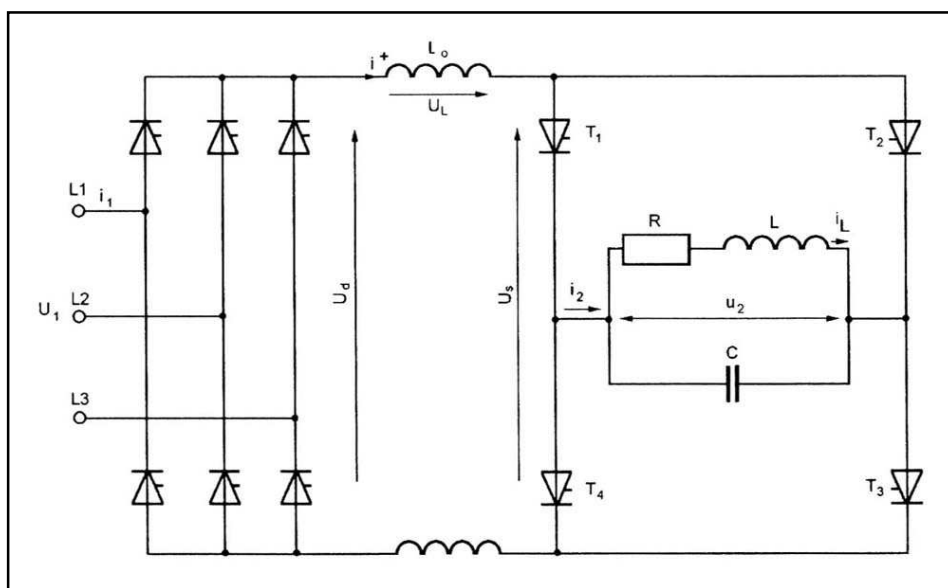
Středofrekvenční zařízení potřebují zpravidla velkou kondenzátorovou baterii. Tato baterie je paralelně připojena k pecní cívce, dodává jalovou složku proudu I_1 v pecní cívce, takže ze zdroje se odebrá pouze činný výkon. Spojení pecní cívky s kondenzátorovou baterií je provedeno pásovými vodiči z mědi. Délka bývá 10 až 20 m. Při provozu pece dbáme vždy na to, aby byl pecní obvod vyladěn právě pro přiváděný kmitočet.

3.3.4. Tyristorové měniče kmitočtu pro středofrekvenční indukční ohřevy

Tyristorový měnič se skládá z usměrňovače střídače. Trojfázový můstkový usměrňovač se střídačem a paralelním zapojením zatěžovacího obvodu pracuje tak, že střídavě je otevřena dvojice tyristorů $T_1 T_3$, po určité době se tyto tyristory uzavřou a ss proud z usměrňovače prochází potom dvojicí tyristorů T_2 a T_4 . Tyto cykly se stále střídají. Ovládání tyristorů, jejich otevírání zajišťuje vnější zdroj impulsů.

Mezi tyristory $T_1 - T_4$ střídače je zapojen vyladěný pecní obvod (L_I , R_I a C). Napájení paralelního obvodu představuje zařízení do obou přívodů, mezi usměrňovačem a střídačem tlumivky, které zajišťují vyhlazení proudu z předcházejícího trojfázového usměrňovače a současně zabraňují, aby poměrně značné oscilační napětí, vznikající na obvodu, nepronikalo zpět do usměrňovače.

Proudové rázy mají konstantní proud a stálé napětí. Pravoúhlé proudové rázy lze rozložit podle Fouriera na základní a vyšší harmonické.



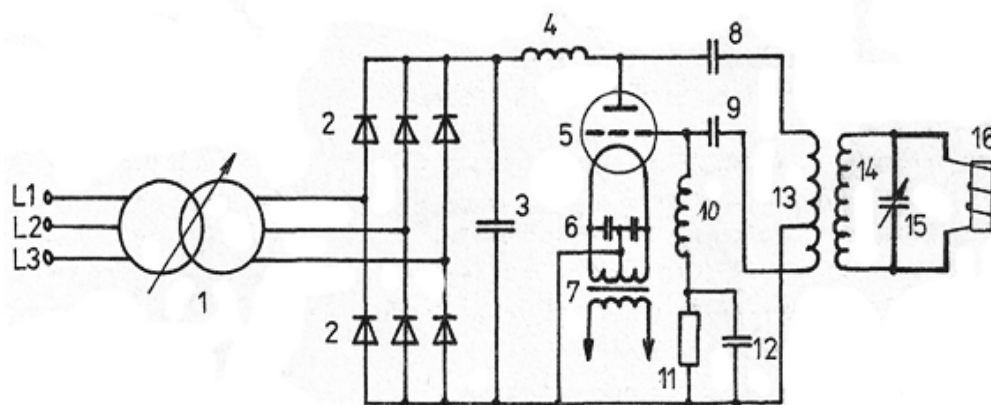
Obr. 25: Tyristorový měnič kmitočtu

Pro jednotlivé typy tyristorů je rozhodující určit maximální kmitočty pro jednotlivé hodnoty t_f a t_s . Pro některé typy tyristorů a hodnoty $\cos \varphi$ 0,87 a 0,75 jsou přehledně uvedeny v tabulce 5, II. doby obnovy závěru a maximální kmitočty.

Druh ventilu	Doba obnovy závěru		Maximální kmitočet	
	t_f	t_s	$\cos \varphi = 0,87$	$\cos \varphi = 0,75$
	(μs)	(μs)	(Hz)	(Hz)
Tyratron	300	365	228	343
Tyristor T 170N	100	125	670	1 000
Tyristor T 170F	30	41	2 000	3 000
Tyristor T 18	12	19	4 000	6 500

Tab. 5: Maximální kmitočty a doby obnovy závěru různých druhů ventilů

3.3.5. Vysokofrekvenční elektronkový generátor nad 50 kHz



Obr. 26: Schéma zapojení pro indukční ohřev

- 1 - regulační vstupní transformátor pro usměrňovač
2. usměrňovači diody usměrňovače
3. vyhlazovací kondenzátor
4. oddělovací tlumivka pro střídavou vysokofrekvenční složku na anodě triody 5
5. výkonová triode
6. kondenzátory zkratující vysokofrekvenční složky proudu katody
7. žhavicí transformátor triody 5
8. oddělovací kondenzátor, který propouští jen střídavé vysokofrekvenční složky
9. oddělovací kondenzátor pro stejnosměrné mřížkové předpětí triody 5, který však umožňuje průtok střídavých vysokofrekvenčních proudů zpětné vazby
10. tlumivka znemožňující zkratování vysokofrekvenčního mřížkového zpětnovazebního napětí kondenzátorem 12

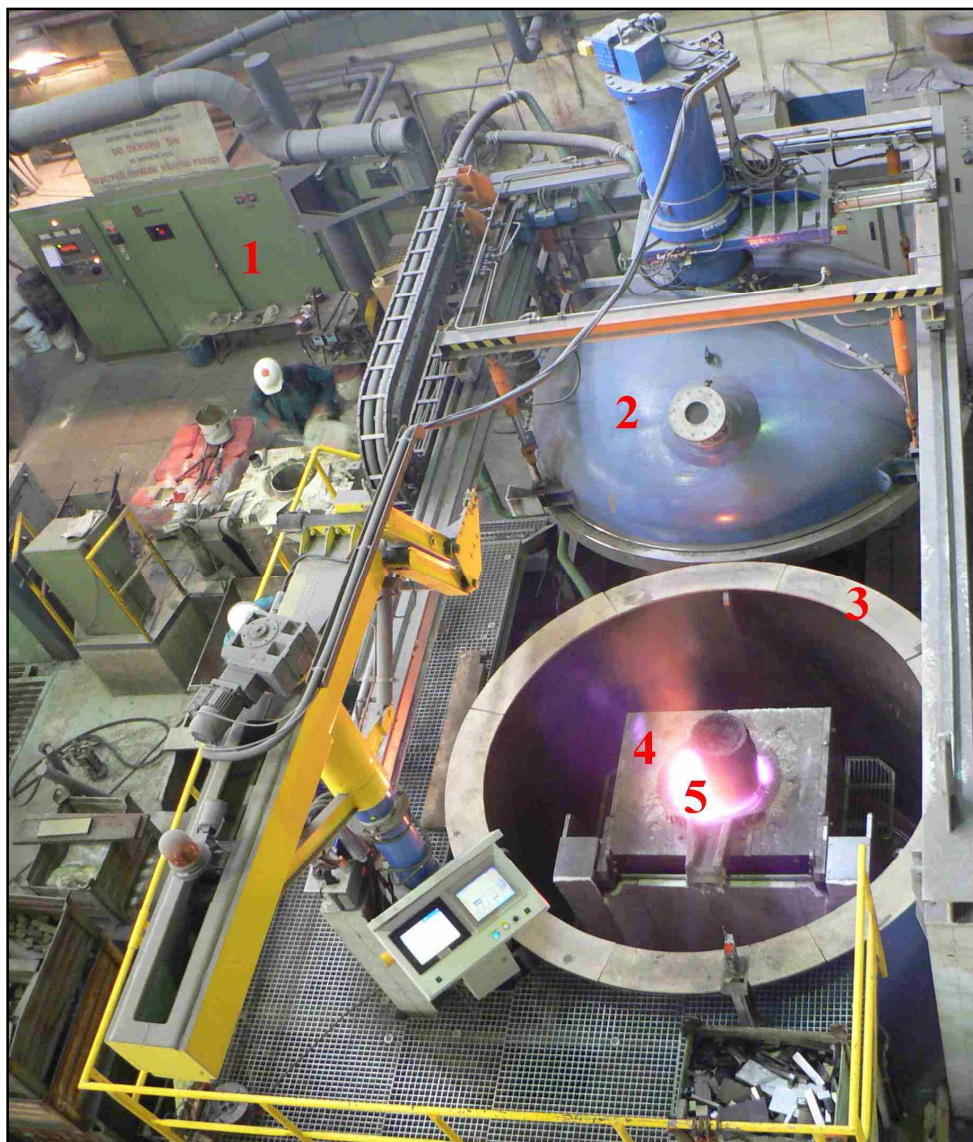
- 11. odpor, na němž vzniká záporné předpětí mřížky triody 5
- 12. filtrační kondenzátor mřížkového předpětí
- 13. primární vinutí vysokofrekvenčního transformátoru 6
- 14. sekundární vinutí vysokofrekvenčního transformátoru
- 15. kompenzační kondenzátor pro ohřívací cívku 16
- 16. ohřívací cívka (induktor) indukčního ohřevu

Indukčností vinutí 13, 14, 16 tvoří s kondenzátorem 15 oscilační obvod, který pracuje na daném vysokém kmitočtu, např. 360 kHz, Zpětná vazba oscilátoru je provedena odbočkou na vinutí 13 a zavedena na mřížku triody 5.

[7,11,13]

4. Vlastní řešení – analýza vakuové indukční pece

Cílem práce bylo provést modelovou elektromagnetickou analýzu pomocí virtuální simulace typové indukční pece provozované v průmyslovém závodě a to především z hlediska elektromagnetického pole induktoru. 3D model virtuálního induktoru je proveden v programu SolidWorks 2009, 3D harmonická analýza je pak simulována v programu Ansys 11.



Obr.27: Vakuová indukční pec před zkouškou tavení

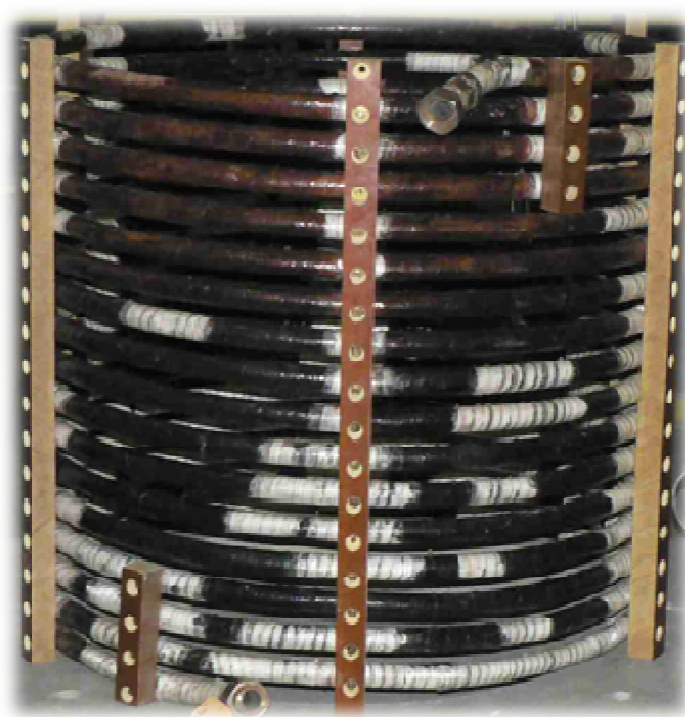
1. napájecí zdroj
2. uzávěr vakuové indukční pece
3. plášť vakuové komory
4. induktor
5. vsázka (tavenina)

Specifickou vlastností vakuové pece je možnost vloženou vsázku ohřívat v ochranné atmosféře v tomto případě vakuum. Šetříme tím nejen životní prostředí ale i energii, protože materiál ohříváme přímo.

I když je provoz vakuové pece celkem energeticky velmi náročný je i zde důležité systém optimalizovat tak, aby výsledná účinnost byla co nejvyšší. Tato účinnost je samozřejmě ovlivněna i jinými faktory jako je např. časově optimální doba ohřevu, rozložení teplot apod.

4.1. Induktor

Cívka je vyrobena z měděného lana s předem určeným počtem 14-ti závitů. Na obr. 28. je uvedena na ukázkou cívka z měděných trubek, na koncích cívky je šroubový uzávěr který slouží k napojení chladicího media (nejčastěji voda) která proudí induktorem a tak induktor chladí. Induktor který dosahuje vysokých teplot je potřeba chladit, pokud by se tak nestalo mohlo by dojít k mechanickému poškození vodiče. Pokud cívka není konstruována k vodnímu chlazení používá se tepelná izolace. V praxi je tento indukční ohřev často využíván jak v domácnostech tak i v průmyslu.



Obr. 28: Cívka z měděných trubek

4.2. Napájecí zdroj

Tento již poměrně zastaralý zdroj má vstupní napětí 3x400 V, dále se skládá z usměrňovače a měniče kmitočtu. Zdroj je určen pro menší indukční pec se vsázkou ve stovkách mm.

Usměrňovač - je elektrické zařízení, které se používá k přeměně střídavého elektrického proudu na proud stejnosměrný.

Měnič kmitočtu - je zařízení, které slouží k přeměně elektrického proudu s určitým kmitočtem na elektrický proud s jiným kmitočtem.



Obr. 29: Napájecí zdroj spolu s usměrňovačem a měničem kmitočtu

4.3. Vyzdívka pece

Vyzdívku pece v podstatě tvoří kelímek s uzavřenou nístějí (tavným prostorem), který je umístěn na ocelové nosné konstrukci a je vyzděn nebo vypěchován suchým nebo polosuchým ohnivzdorným, izolačním materiálem nejčastěji na bázi magnesitu nebo křemíku.



Obr. 30: Vyzdívka pece (kelímek) s již usazeným vodou chlazeným induktorem

4.4. Popis a cíle vlastního řešení

Cílem vlastního řešení bylo stanovit rozložení elektromagnetického pole a vířivých proudů ve vedení indukční pece v podobě 3D modelu s respektováním spirály induktoru. Pracovní frekvence indukční pece byly stanoveny v rozmezí 600 – 1000 Hz. Pro pracovní rozsah řešení pece byly zvoleny hodnoty zátěžového proudu v rozmezí 100 – 3000 A. Za tímto účelem byl vytvořen 3D model, který odpovídá základním rozměrům řešené pece.

Práce je rozdělena do několika částí:

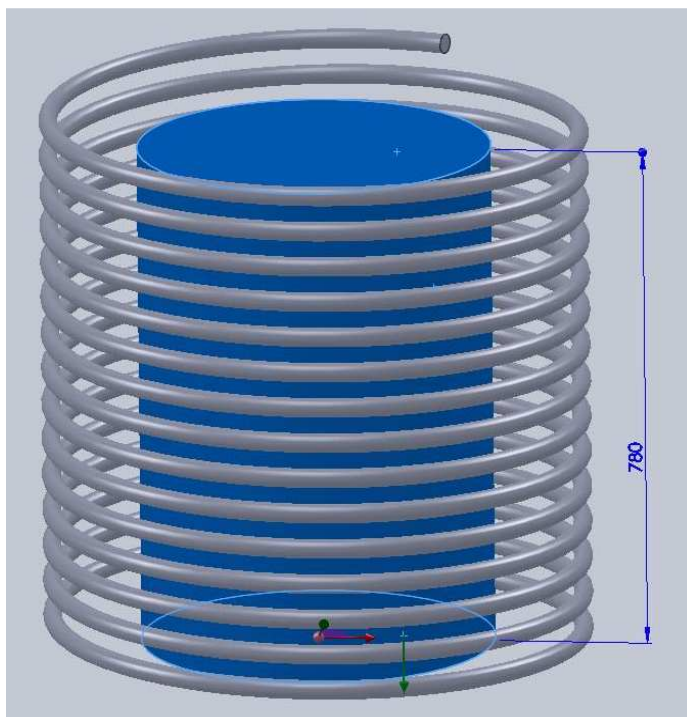
1. část - tvorba 3D geometrie modelu induktoru a vsázky v sw prostředí SolidWorks 2009
2. část - vytvoření výpočetní sítě v programovém prostředí ANSYS Workbench
3. část - v této části jsou zobrazeny konečné výsledky v podobě 3D grafických map jak pro reálnou, tak pro imaginární složku, jsou zde také uvedeny hodnoty magnetické indukce B_{sum} [T] a intenzity magnetického pole H_{sum} [A/m] pro proudy v rozmezí $I = 100 - 3000$ A a při frekvenci $f = 1000$ Hz. Tepelné ztráty vznikající na povrchu taveniny v podobě Joulových ztrát J_{HEA} a proudová hustota J_{Tsum} [A/m²] jsou zde také uvedeny.

4.4.1. ČÁST 1.: Tvorba geometrie modelu

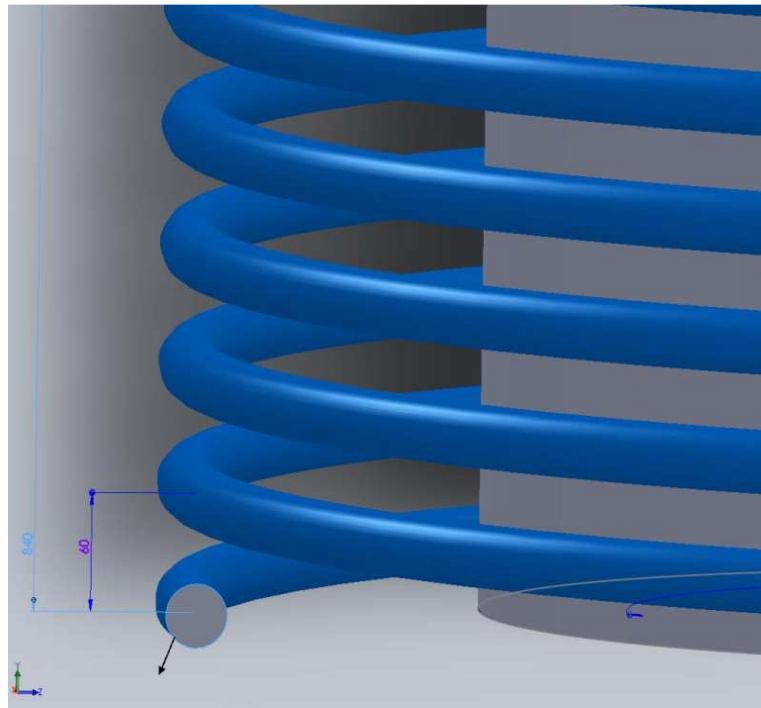
Výpočetní model indukční pece se skládá ze tří částí (induktor, vsázka, okolí).

Induktor je ve tvaru spirály s 14-ti závity s následujícími parametry:

Poloměr spirály	$r = 425$ mm
Výška spirály	$h = 870$ mm
Průřez vodiče spirály	$r_s = 15$ mm



Obr. 31: návrh vlastního modelu (cívka, tavenina)



Obr. 32: detail návrhu cívky

Tavenina se nachází vně induktoru je ve tvaru válce s rozměry:

Výška	$h = 780\text{mm}$
Poloměr	$r = 285\text{mm}$

Jako okolí induktoru a taveniny slouží vzduch nebo vakuum. Model je vytvořen v programu SolidWorks 2009 (SW).

Návrh induktoru vychází z rozměrů skutečné pece. Při návrhu indukční pece jsem se potýkal s problémy které programové prostředí SolidWorks nedokáže řešit z důvodu jeho technického omezení. Z tohoto důvodu SW byla importována 2D verze modelu do programu ANSYS 11 ve kterém se původní model dále upravoval.

Shrnutí základních parametrů indukční pece:

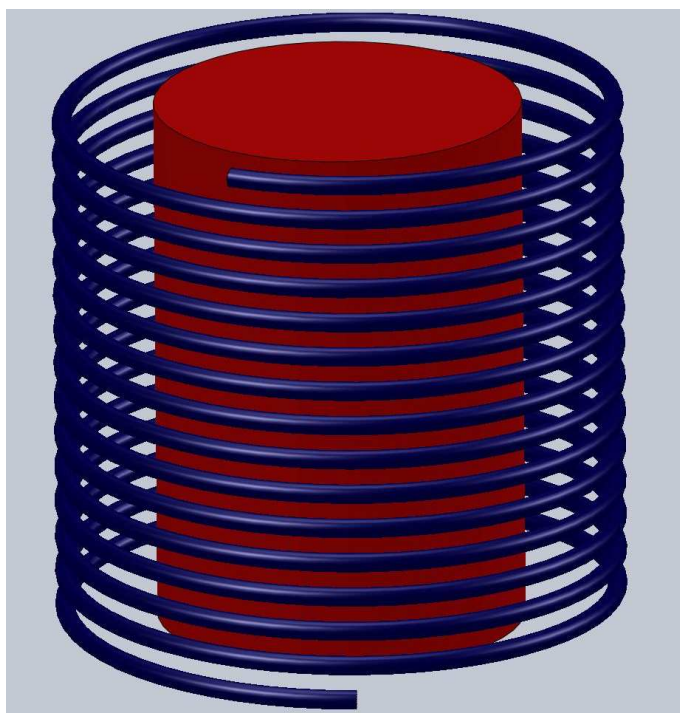
Pracovní rozsah zátěžového proudu	$I = 0 - 3000\text{ A}$
Rozsah pracovní frekvence	$f = 600 - 1000\text{ Hz}$
Maximální výkon indukční pece	$P_{max} = 600\text{ kW}$

4.4.2. ČÁST 2.: Vytvoření výpočetní sítě

Tvorba výpočetní sítě v programovém prostředí ANSYS Workbench.

1. krok

Pro tvorbu výpočetní sítě v programu Ansys Workbench bylo nutné původní 3D model z programu SolidWorks obr. 33 importovat do programového prostředí Ansys Workbench. Ve kterém se následně provedl tzv. meshing, který se používá při řešení simulace fyzikálního modelu.

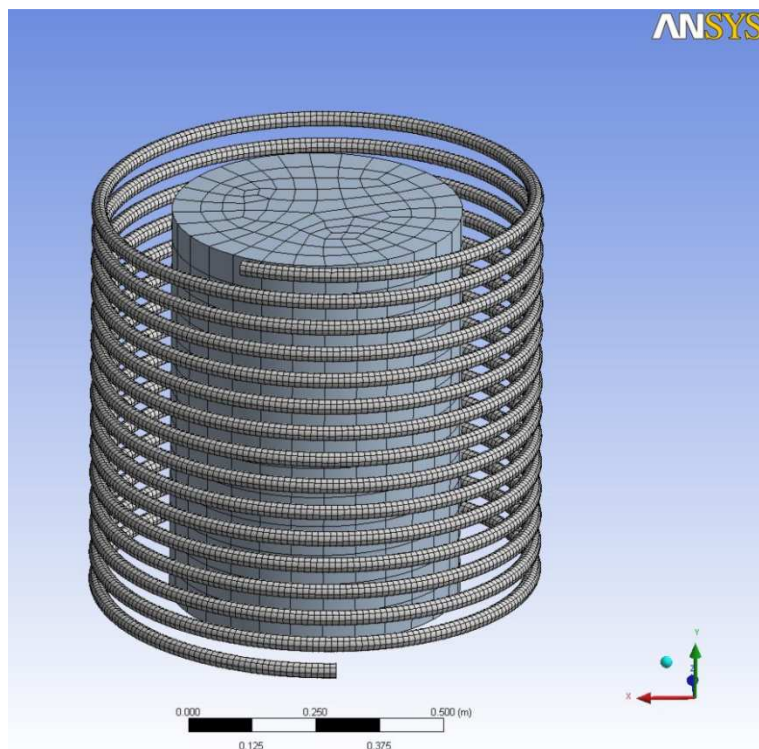


Obr. 33: Výsledný 3D model z sw prostředí SolidWorks
(červeně tavenina, modře induktor)

2. krok

V tomto importovaném 3D modelu je provedena MESH analýza. MESH analýza je proces, při kterém se pokrývá 2D nebo 3D geometrický model řešené úlohy elementy, tvořící výpočetní síť.

Pro další pokračování úlohy byly nutné provést výpočty 3D harmonické analýzy pro proudy v rozmezí 100A - 3000A při frekvenci 1kHz. 3D Harmonická analýza v program Workbench nešla řešit, protože program není pro určený typ analýzy vhodný. Protože program neumožňuje řešit tento druh analýzy rozhodl jsem se zvolit nové sw prostředí ANSYS 11 basic.



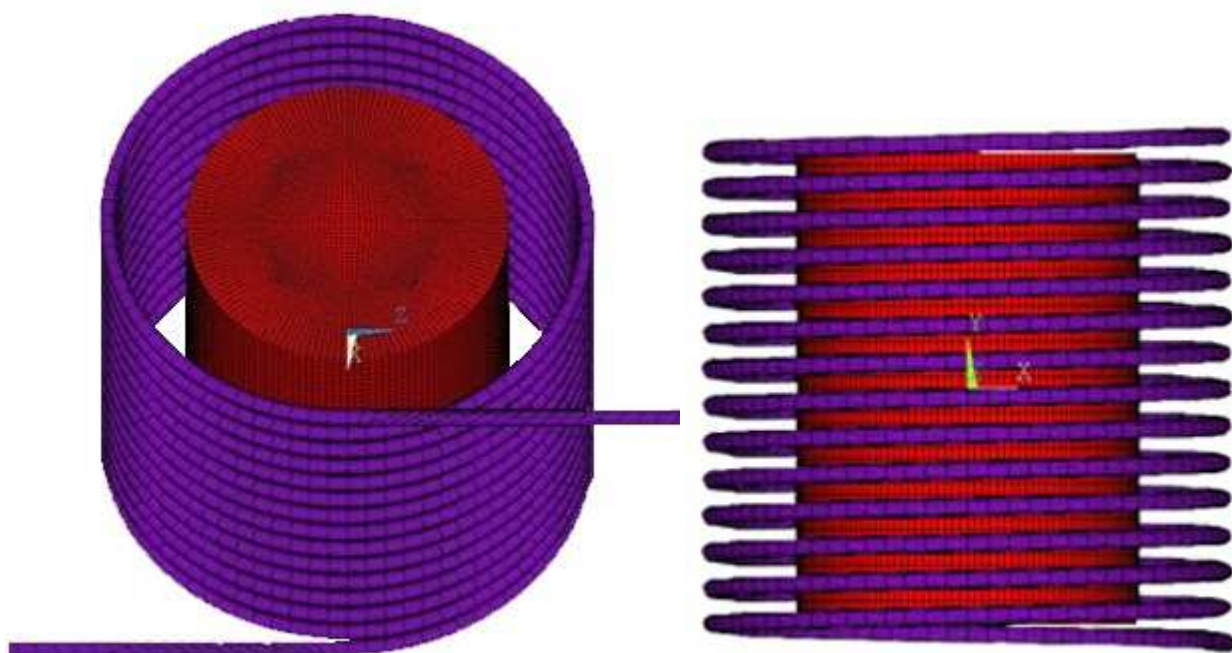
Obr. 34: výsledný model po výpočtu analýzy MESH

3. krok

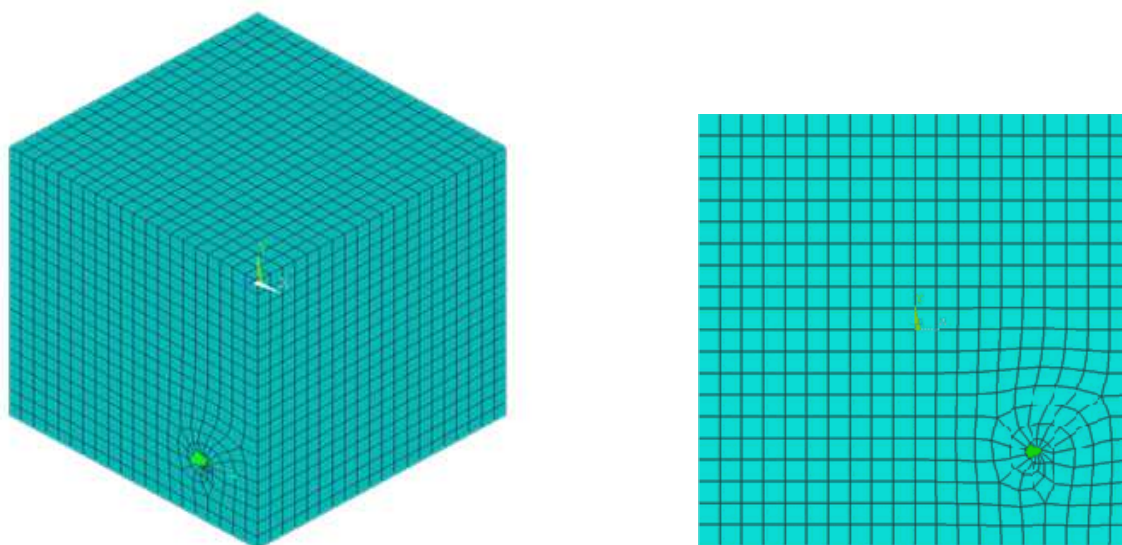
Protože program nepodporuje výpočet 3D harmonické analýzy, zahájil jsem novou tvorbu celého modelu v prostředí ANSYS 11 basic. Tento návrh obsahoval návrh induktoru, taveniny a okolí indukční pece v podobě vzduchu za pomoci elementů potřebných k výpočtu např. SOLID 117 nebo SOURC 36. Oba tyto elementy jsou nezbytné pro simulaci a analýzu v sw ANSYS 11 basic.

Analýza a rychlost samotného výpočtu je závislá na 3D geometrickém rozložení tělesa a četnosti pokrytí elementů. Model se kterým jsem pracoval byl geometricky rozměrný a obsahoval více než 1,5 miliónu elementů, to se také negativně projevilo na délce výpočtu počítače. Bylo zde potřeba výkonného PC zejména pak CPU (řádově GHz) s dostatkem operační paměti RAM (30 Gb). Školní PC na kterém výpočet probíhal je relativně výkony ale model s takto početnými elementy nebyl ani po 14-ti dnech schopný, dopracovat se k výsledku.

Analýza se musela v průběhu výpočtu několikrát přerušit, jelikož bylo nastaveno špatné konvergenční kritérium. Model ve tvaru spirály, je pro výpočty rozložení elektromagnetického pole příliš složitý, protože geometrické pokrytí 3D modelu elementy tvořící výpočetní síť (MESH) je velmi jemné. Z důvodu délky samotného výpočtu a nedostatku času jsem musel od této metody výpočtu upustit.



Obr. 35: 3D model indukční pece, fialová barva značí induktor, červená barva taveninu

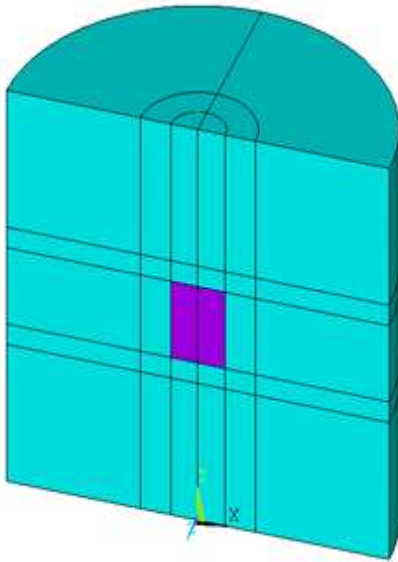
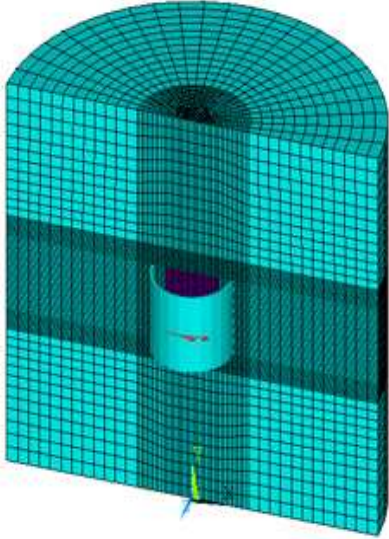
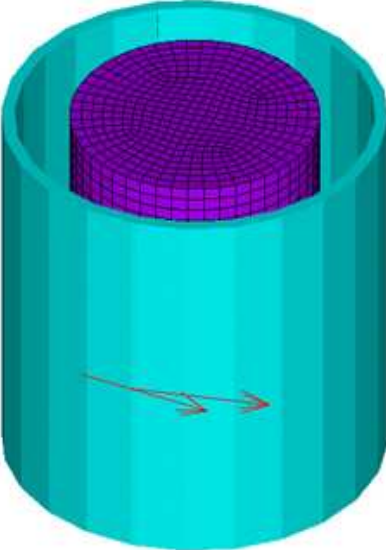


Obr. 36: Výsledný model i s okolím v podobě krychle (zelená barva označuje konce cívky)

4. krok

Zde jsem použil zcela nový 3D model pece, který je redukovaný oproti původnímu 3D modelu použitý v 3-tím kroku, neobsahuje hustou síť elementů, snížila se tím i doba pro výpočet. Došlo zde i ke změně geometrie 3D modelu z důvodu urychlení výpočtu a to z podoby spirály na dutý válec. Tento model byl rovněž vytvořen v programovém prostředí ANSYS 11 basic.

Hodnoty pracovního proudu a frekvence se u redukovaného modelu nezměnili, tato redukce bude mít minimální vliv na maximální výkon indukční pece. Max. výkon tedy bude přibližně stejný cca $P_{\max} = 600 \text{ kW}$. Elementy použité k výpočtu se nemění, základem je SOLID 117, který slouží pro výpočet rozložení 3D magnetického pole a element SOURC 36, který se používá jako zdroj proudu při simulaci v magnetickém poli.

3D model indukční pece v řezu	3D model v řezu tavenina, induktor, okolí (vzduch)	3D model cívky se vsázkou
		

Tab. 6: 3D model tavenina, induktor, okolí (vzduch)

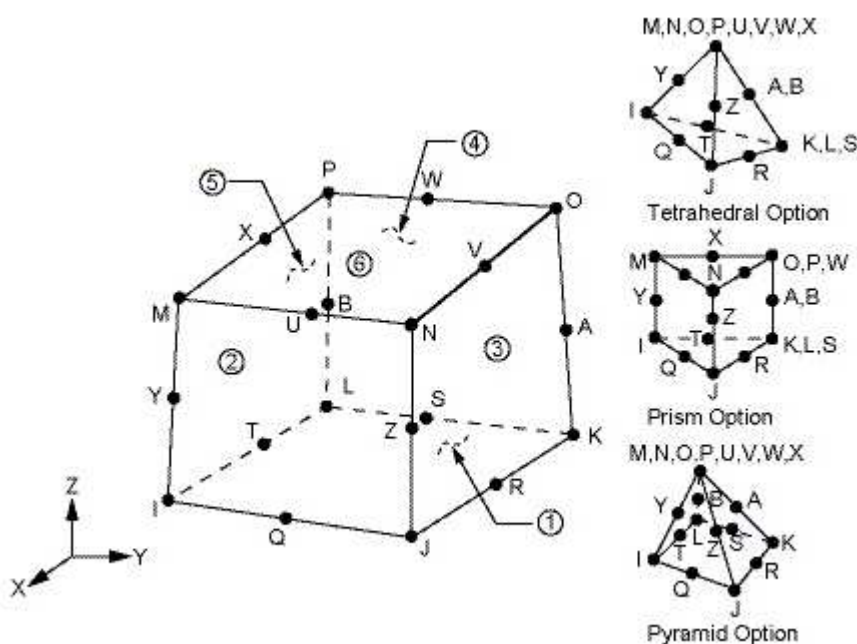
V tabulce 6 je znázorněn počítačový model indukční pece. Fialová barva zde znázorňuje taveninu, zelená barva pak induktor popř. okolí induktoru. Jak už bylo zmíněno výše, induktor je ve tvaru dutého válce z důvodu usnadnění výpočtu. V reálném provozu, by takto řešený model musel být dutý z důvodu chlazení vodou. Vypočítané elektromagnetické pole odpovídá SS proudu o dané velikosti procházející cívku.

4.4.3. Elementy použité k výpočtu:

SOLID 117 - pro výpočty rozložení 3D magnetického pole

Prvek je definován 20-ti uzly. Osm rohových uzlů nese časově integrovaný elektrický potenciál DOF, VOLT (klasická formulace) nebo elektrický potenciál DOF, VOLT (solenoidová formulace). Solenoidová formulace je vhodnější pro řešení 3D harmonické magnetické analýzy.

DOF, VOLT – elektrický potenciál



Obr. 35: Souřadnicový systém elementu solid117, rozložení uzlů a geometrie

SOLID117 je aplikován pro výpočet nízkofrekvenčních analýz magnetického pole: magnetostatiky a vířivých proudů (časově střídavé harmonické a přechodné rozboru). Prvek je magneticky nelineární a umožňuje modelování magnetizační křivky nebo demagnetizační křivky permanentního magnetu pro statické a přechodné analýzy.

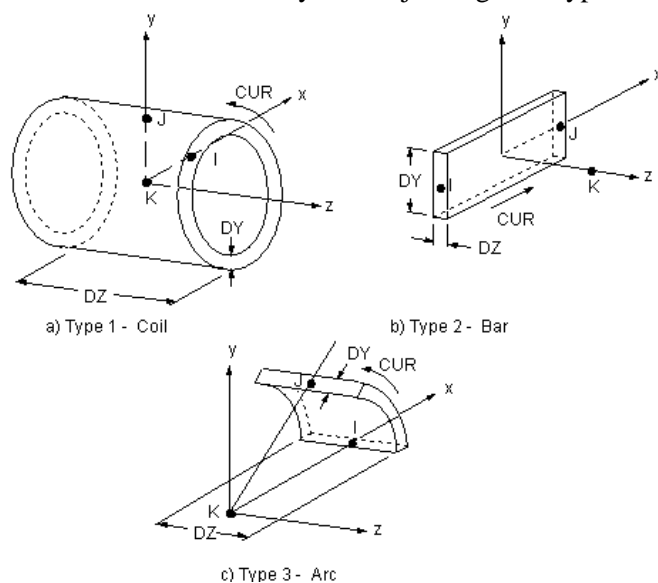
K modelování plného vodiče je zapotřebí vazeb CIRCUI24, CIRCUI25 a TRANS126. Lineární nesouměrná solenoidová formulace je vhodná pro harmonickou analýzu. Vířivé proudy v plných vodičích využívají metodou časově integrovaného elektrického potenciálu VOLT.

Element solid 117 používá k modelování dvě metody:

1. Klasická formulace se používá pro modelování vzduchu, železa, neželezných materiálů nebo permanentních magnetů u této metody se využívá prvku SOURC36. Tato metoda má omezenou použitelnost pro harmonické a přechodové analýzy, protože proud nelze měnit po čas zátěže.

Element SOURC 36:

Element SOURC 36 se používá jako zdroj proudu při řešení simulací v magnetickém poli, prvek obsahuje předem definované geometrie. Proudů jsou použity k výpočtu intenzity magnetického pole. Prvek používá Biotův-Savartův zákon který obsahuje integrální výpočetní techniky.



Obr. 36: Souřadnicový systém elementu SOURC36, rozložení uzlů a geometrie

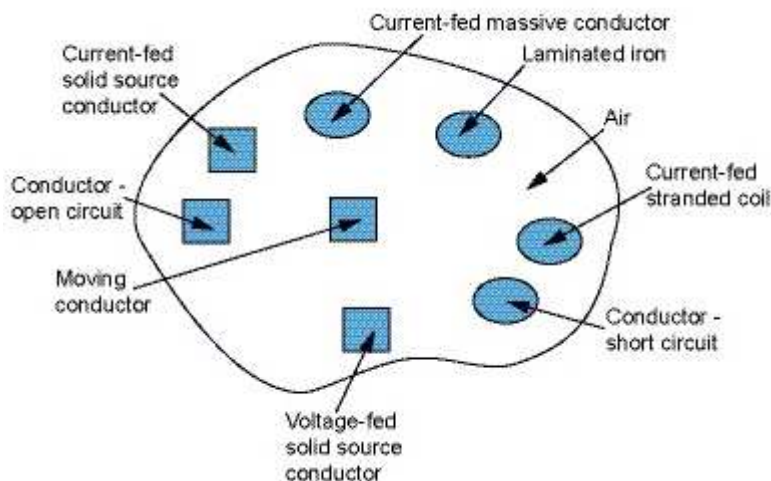
V elementu SOURC 36 lze nastavit různé parametry, které určující výslednou definici zatěžovací dráhy:

- DY – rozměr Y pro daný typ zdroje
- DZ – rozměr Z pro daný typ zdroje
- EPS – konvergenční kritérium zdroje H
- CUR – celkový proud přitékající ze zdroje

2. Solenoidova formulace se používá k modelování plného vodiče bez efektu Foucaultova proudu. Solenoidová formulace používá napěťové napájení zátěže, součtového obvodu schopnosti vazby s CIRCUI124, CIRCUI125, a TRANS126 elementy. Nelineární souměrná solenoidová formulace je vhodná pro řešení statické analýzy. Elektrický žebříčkovitý potenciální VOLT DOF není časově integrovaný.

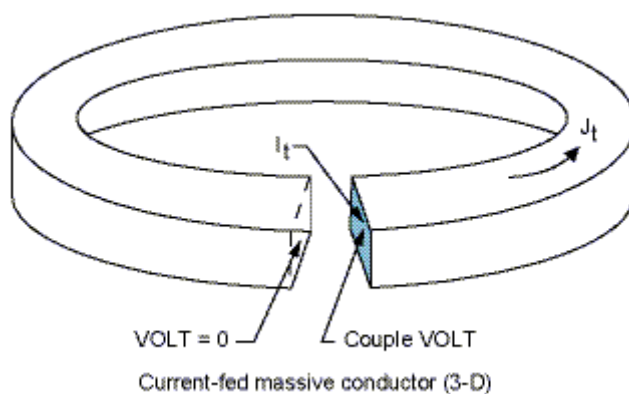
Fyzická oblast s volitelnými terminálovými podmínkami pro elektrický vodič

Na obrázku 40 jsou uvedeny typické oblasti podle charakteru, s elektrickou vodivostí případně bez elektrické vodivosti, a tedy regiony ve kterých mohou vznikat vířivé proudy případně nemohou. Tato klasifikace je podstatná pro samotnou tvorbu modelu a výpočet. pomocí elementu solid 117 můžeme modelovat oblasti v nichž se uplatňuje povrchový jev a vznikají vířivé proudy.



Obr. 40: Oblast pro 3D magnetickou analýzu s podmínkami

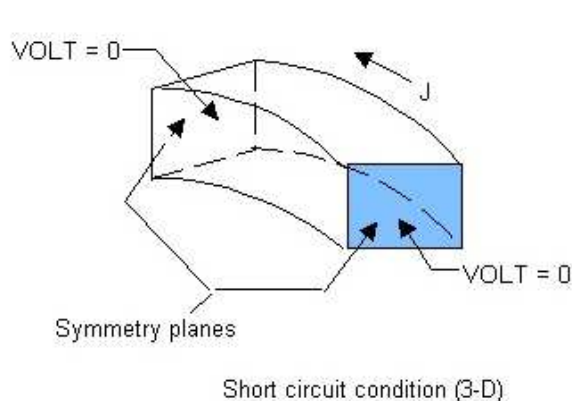
Current-fed solid source conductor -	Proudový napáječ, pevný zdroj vodiče
Conductor - open circuit -	Elektrický vodič, otevřený obvod
Moving conductor -	Pohybující se el. vodič
Voltage-fed solid source conductor -	Napětově napájený zdroj el. vodiče
Conductor short circuit -	Zkrat el. vodiče
Current-fed stranded -	Zkroucený proudový napáječ
Air -	Vzduch
Laminated iron -	Vrstvené železo
Current-fed massive conductor -	Proudový napáječ, silný el. vodič



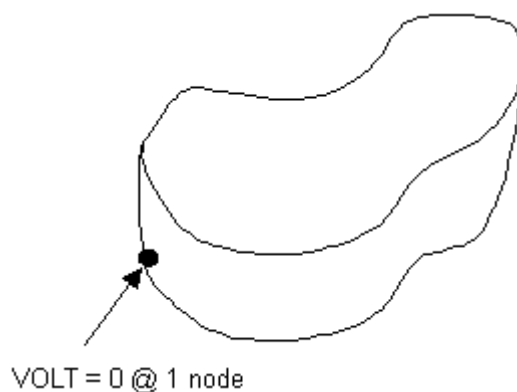
Obr. 41: Proudový vodič

Elektromagnetické pole se může ve zvláštních případech řešit střídavým (AC) buzením. Elektromagnetické pole vytvářené proudovým vodičem Obr. 41 je použitelné pro statické, harmonické a přechodové analýzy. Průběh řešení 2D harmonické analýzy je podobný jako při řešení 3D harmonické analýzy v rámci prvku KEYOPT.

VOLT = 0	- Elektrický potenciál
COUPLE VOLT	- Výřez plochy proudového vodiče
I_t	- Proudová hustota ve vyznačeném výřezu
J_t	- Celková proudová hustota



Obr. 42: Část obvodu proudového vodiče



Obr. 43: Definovaná 3D struktura

VOLT -	elektrický potenciál
Symmetry planes -	symetrické plochy

Výřez proudového vodiče obr. 42, kde každá jeho část má zvláštní charakteristické rysy. Plocha VOLT (na obrázku modře) používá v této oblasti ke sčítání proudů jednotlivé uzly. Na obr. 43 se pro souměrnou strukturu nastavuje elektrický potenciál VOLT = 0 s několika uzly v jedné ploše. Pro 3D struktury se nastavuje elektrický potenciál VOLT = 0 v jednom uzlu.

4.4.4. Harmonická analýza:

Harmonická analýza slouží k popisu signálů ve frekvenční oblasti. Jakýkoli periodický signál libovolného tvaru lze rozložit na součet nekonečně mnoha harmonických signálů. Vždy platí, že kmitočty těchto tzv. harmonických složek jsou celistvými násobky základního kmitočtu signálu.

Například: Obdélníkový signál o kmitočtu 1Hz můžeme získat složením teoreticky nekonečně mnoha sinusovek o kmitočtech 1Hz, 2Hz, 3Hz, atd.

Obdélníkový signál o kmitočtu 15Hz můžeme získat složením teoreticky nekonečně mnoha sinusovek o kmitočtech 15Hz, 30Hz, 45Hz, 60Hz atd.

Každá z těchto sinusovek má jinou amplitudu, kterou můžeme zakreslit do grafu. Získáme tak tzv. amplitudové frekvenční spektrum. Každá z těchto sinusovek má také jinou počáteční fázi, kterou můžeme rovněž zakreslit do grafu. Získáme tak tzv. fázové frekvenční spektrum. Hlavním problémem každého pole $q(r,t)$ závislost na prostoru r a času t proměnné. V harmonické analýze, čas závislosti může být popisovaný periodickými funkcemi:

$$q(r,t) = a(r) \cos(\omega t + \Phi(r)) \quad (13)$$

$$q(r,t) = c(r) \cos(\omega t) - s(r) \sin(\omega t) \quad (14)$$

Rozklad harmonické analýzy není jednoduchý a je k němu nezbytné důkladně ovládat potřebný matematický aparát a poněkud hlouběji rozumět elektronice a teorii střídavých periodických signálů. Řešení harmonické analýzy patří v elektrotechnice k velmi často používaným výpočtům.

Pomocí analýzy je možné objasnit změnu tvaru signálu po průchodu nejrůznějšími frekvenčně nelineárními obvody (zesilovačem, integračním nebo derivačním článkem, telefonním vedením). Z výsledku harmonické analýzy je patrné, jak je signál bohatý na vysokofrekvenční složky a jaké kmitočtové pásmo je třeba zvolit, aby byl signál přenesen s co možná nejmenší změnou tvaru a ztrátou vyšších harmonických složek. Analýza střídavého signálu je tedy velmi důležitá, ovšem její vyřešení bez použití počítače je značně zdlouhavé a pravděpodobnost výskytu početní chyby je nepříjemně vysoká.

Například rozklad průběhu na prvních deset harmonických s použitím kalkulačky trvá nejméně jednu hodinu, přičemž je třeba spočítat okolo dvou set výpočtů se sinem, kosinem a dalšími goniometrickými funkcemi. Hlubší analýza po dvacátou a vyšší harmonickou je prakticky nemyslitelná.

Matematicky i fyzikálně je dokázáno, že periodické signály libovolného tvaru, s jejichž nejrozmanitějšími průběhy v elektrotechnice běžně pracujeme, lze nahradit řadou sinových a kosinových průběhů. Jejich amplitudy, kmitočty a vzájemná fázová posunutí lze zjistit výpočtem nebo měřením. V praxi to srozumitelně řečeno znamená, že ať má graf periody signálu tvar obdélníku, pily či úplně jiný tvar, skládá se vždy z řady harmonických sinusových průběhů, jejichž kmitočet je celistvým násobkem frekvence první harmonické. Opačně je také možné říci, že skládáním sinových či kosinových průběhů lze získat jakýkoliv tvar signálu. Dle matematické poučky může být každá jednoznačně určená periodická funkce $F(t)$, která má v intervalu T konečný počet extrémů a nespojitostí prvního druhu, vyjádřena Fourierovou řadou, tj. nekonečnou goniometrickou řadou ve tvaru

$$F(t) = a_0 + a_1 \cos \omega t + a_2 \cos 2 \omega t + \dots + a_n \cos n \omega t + b_1 \sin \omega t + b_2 \sin 2 \omega t + \dots + b_n \sin n \omega t \quad (15)$$

4.4.5. Měrný elektrický odpor

Rezistivita (elektrický odpor) je fyzikální veličina, vyjadřující elektrický odpor vodiče jednotkové délky (1 m) a jednotkového obsahu průřezu (1 m²). Rezistivita je převrácená hodnota konduktivity (měrné vodivosti). Rezistivita je materiálová konstanta, která charakterizuje elektrickou vodivost látky. Čím větší je rezistivita, tím menší je vodivost dané látky. Čím větší je rezistivita, tím větší je elektrický odpor.

$$\rho = \frac{R \cdot s}{l} \quad (16)$$

ρ - měrný odpor [Ω.m]
 R - elektrický odpor [Ω]
 s - průřez vodiče [mm²]
 l - délka vodiče [m]

Závislost na teplotě

Závislost rezistivity na teplotě se vyjadřuje vztahem:

$$\rho = \rho_0(1 + \alpha \cdot \Delta t) \quad (17)$$

ρ - měrný odpor [Ω.m]
 ρ_0 - počáteční rezistivita [Ω.m]
 Δt - rozdíl teplot [°C]
 α - teplotní součinitel elektrického odporu [K⁻¹]

Hodnoty rezistivity (při teplotě 20 °C). Údaje v různých tabulkách se mohou mírně lišit - záleží na konkrétním zpracování měřeného vzorku materiálu:

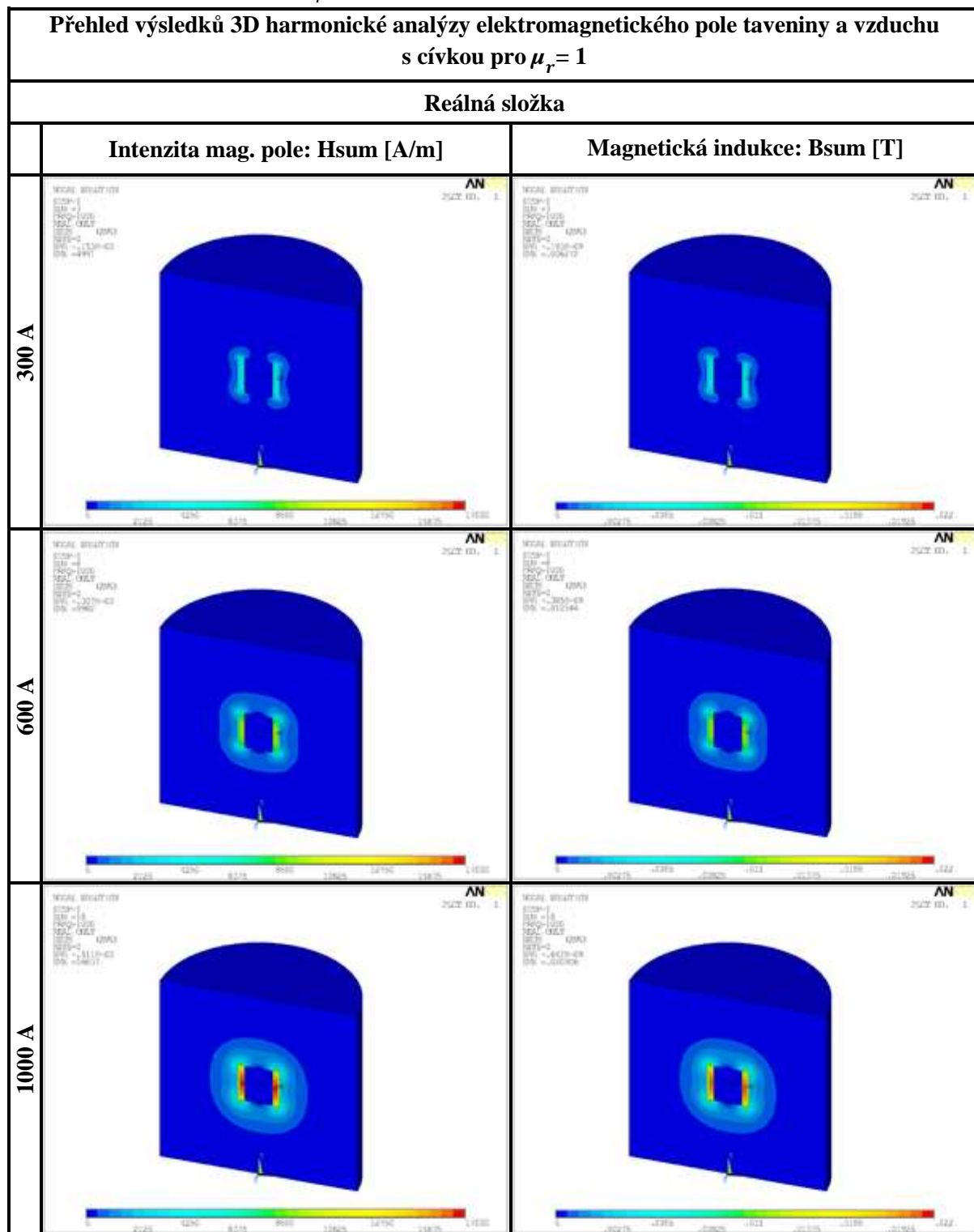
látká	ρ [10 ⁻⁶ Ω.m]	α [10 ⁻³ K ⁻¹]
stříbro	0,0152	4,0
měď	0,0169	4,0
bronz	0,17	2
hliník	0,0267	4,0
wolfram	0,0536	4,8
platina	0,106	3,9
olovo	0,206	4,2
nikl	0,07	6,7
kanthal	1,4	0,06
uhlík	60	-0,2 – (-0,8)
litina	0,6 – 1,5	1,9
ocel měkká	0,1 – 0,2	5
mosaz	0,08	1,5

Tab. 6: Hodnoty rezistivity a její závislosti na teplotě

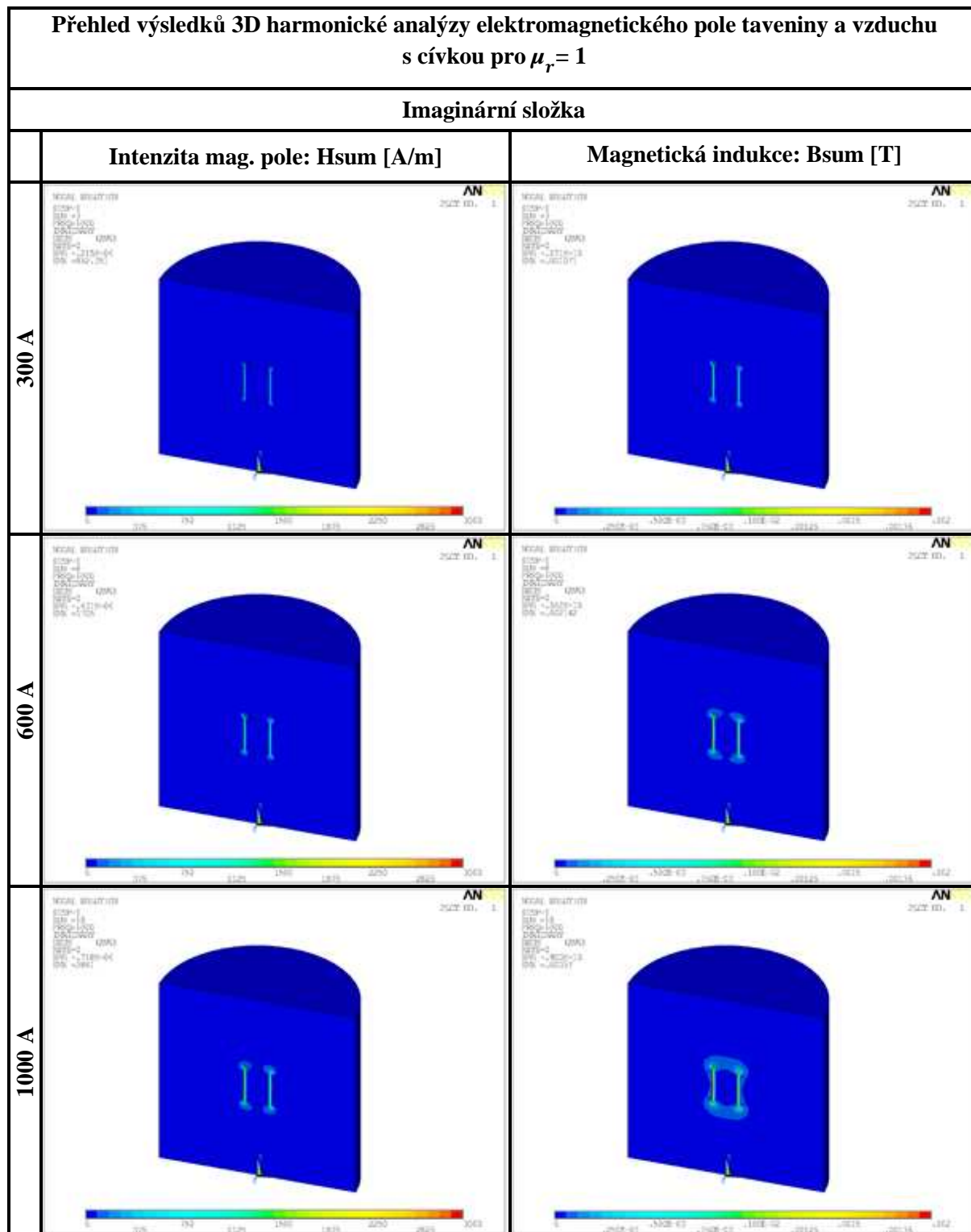
[6,8,16]

4.4.6. ČÁST 3.: Přehled výsledků 3D harmonické analýzy

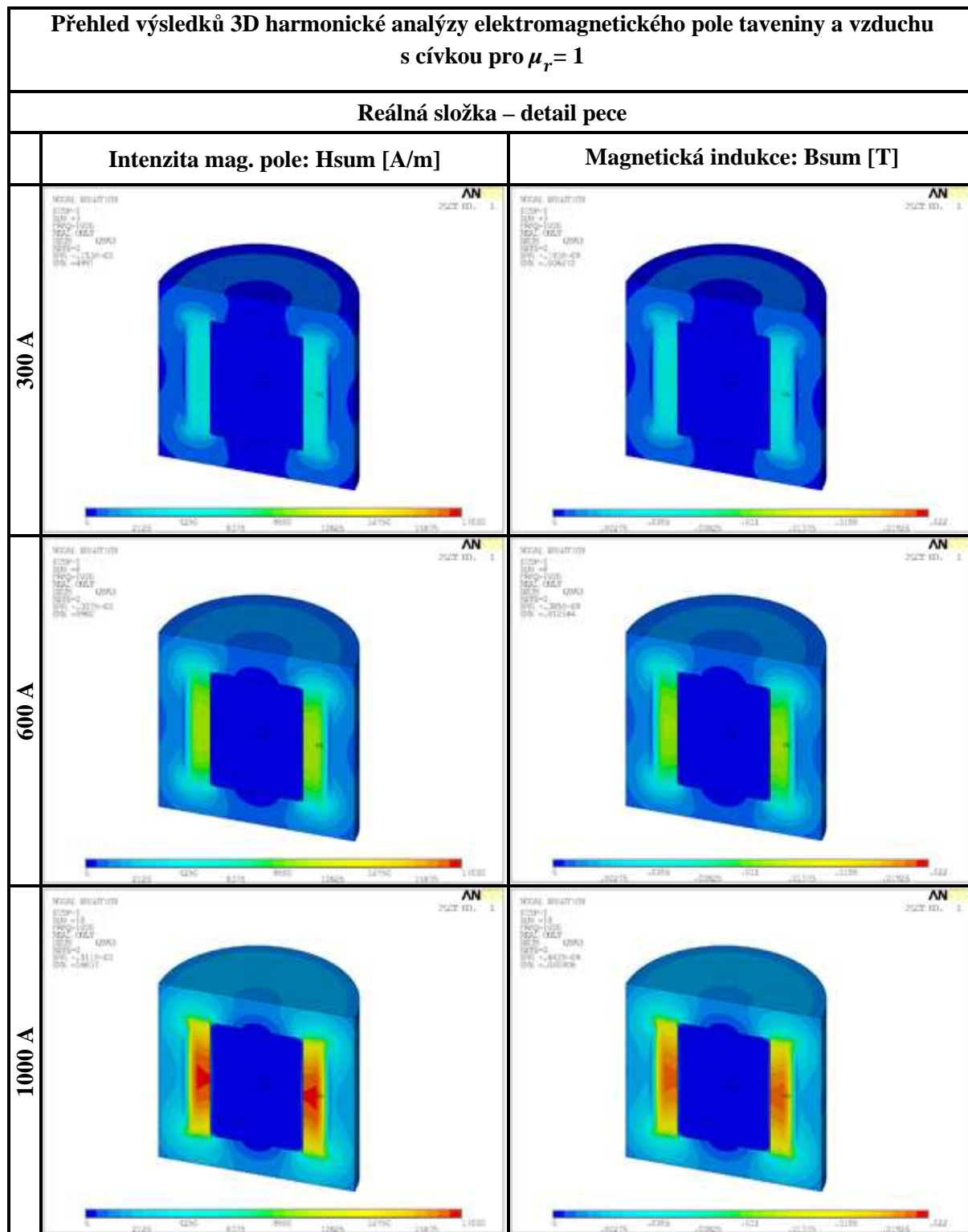
V následujících tabulkách jsou výsledky 3D harmonické analýzy ve zmenšené podobě. Zvolil jsem tři pracovní proudy 300 A, 600 A a 1000 A aby bylo zřetelné, mění se magnetické pole indukční pece. Jelikož má model lineární parametry vypadají obrázky podobně, liší se ale v rozdílných hodnotách na stupnici. V tabulkách vidíme měnit se intenzitu magnetického pole H a magnetickou indukčnost B s permeabilitou $\mu_r = 1$ jak pro reálnou tak imaginární složku.



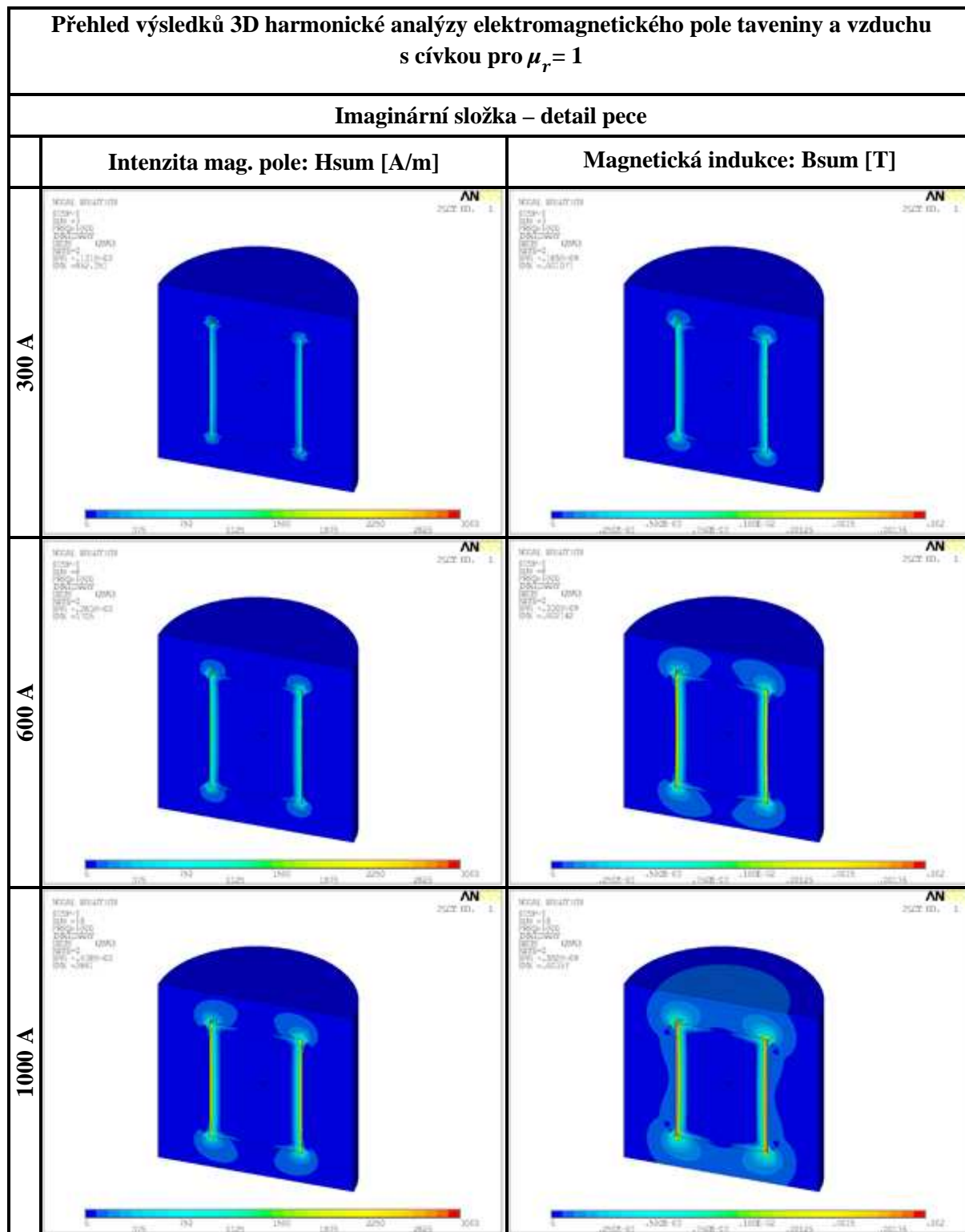
Tab. 7: Průběh elektromagnetického pole pro reálnou složku



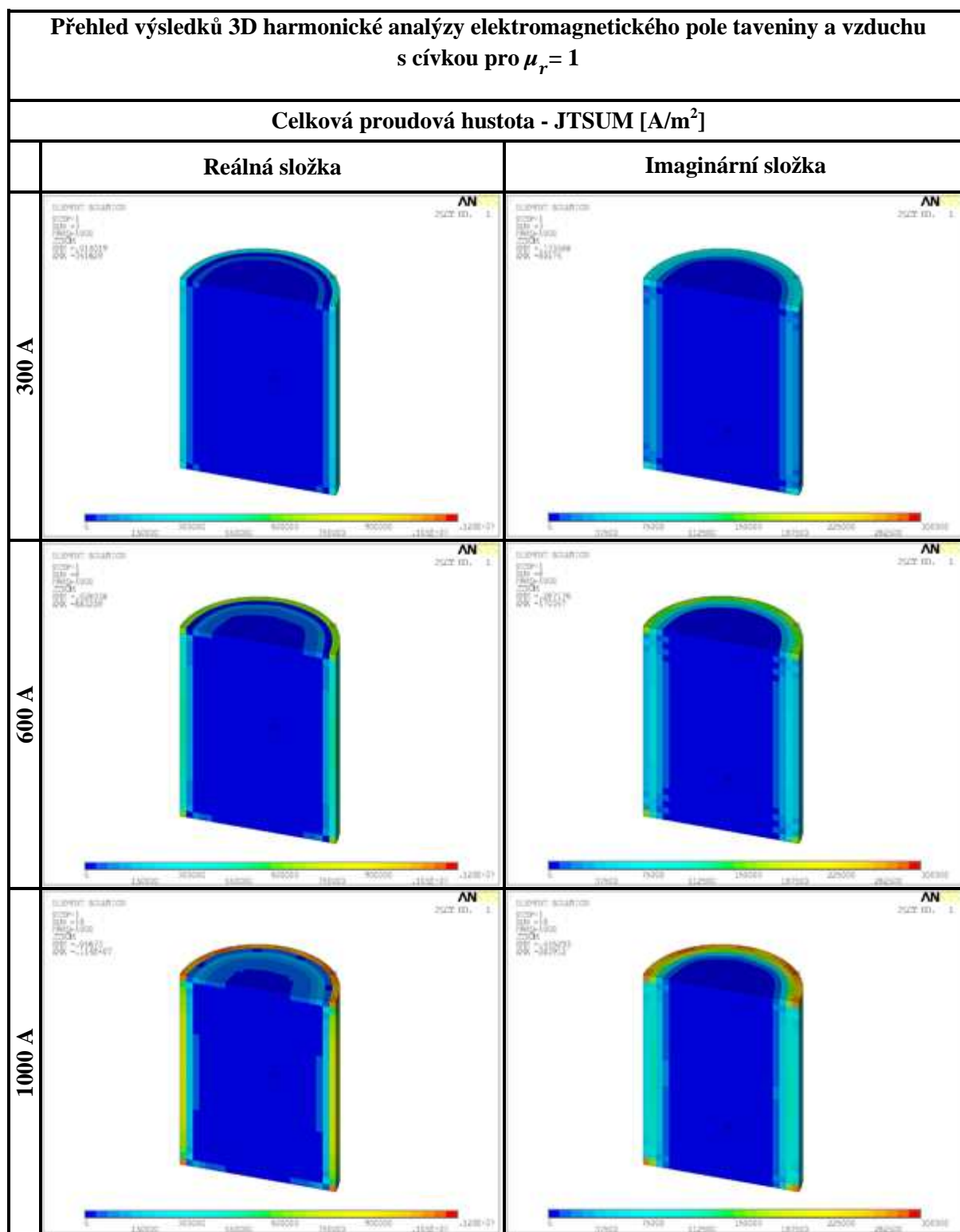
Tab. 8: Průběh elektromagnetického pole pro imaginární složku



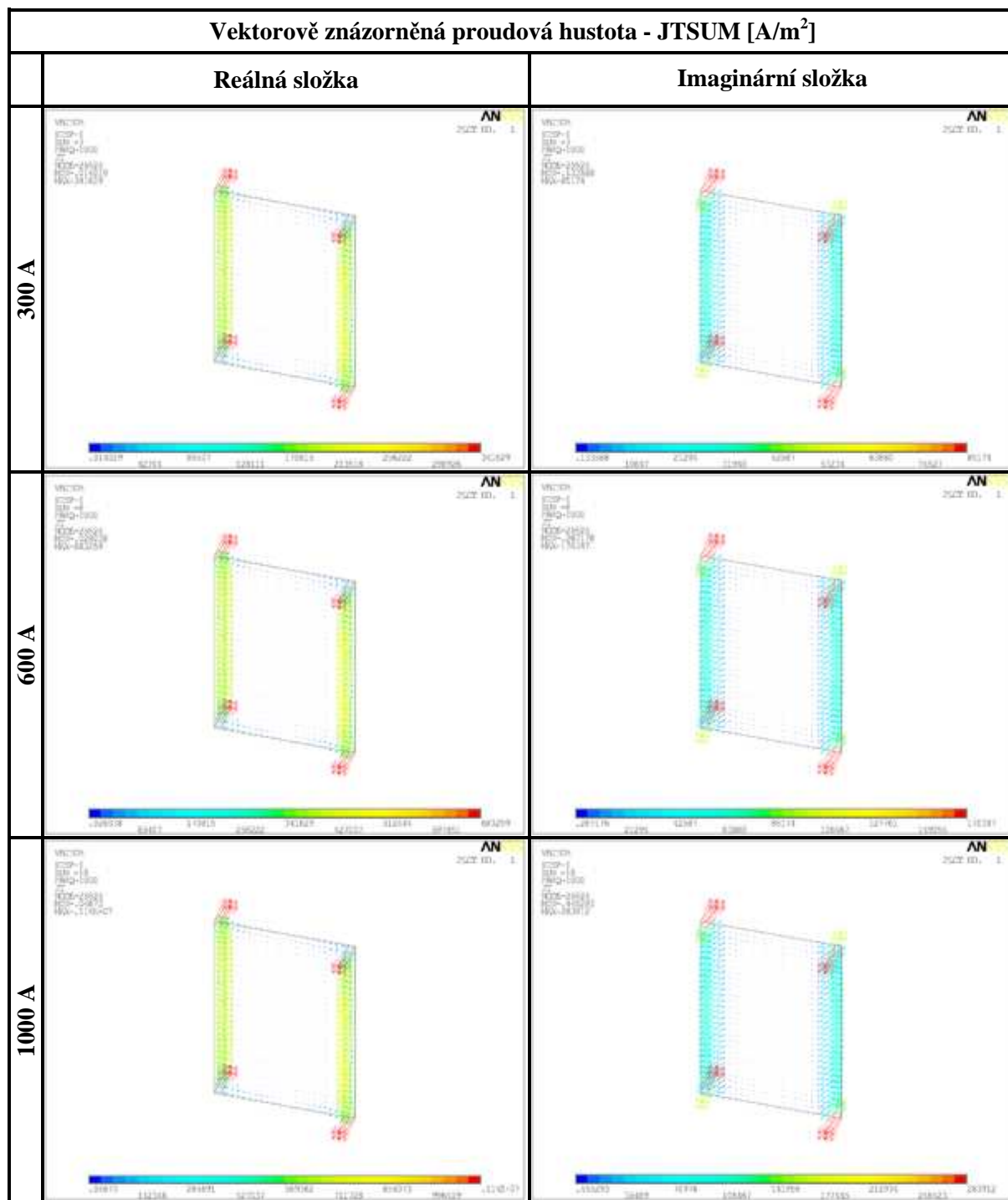
Tab. 9: Zvětšený výřez elektromagnetického pole indukční pece s $\mu_r = 1$



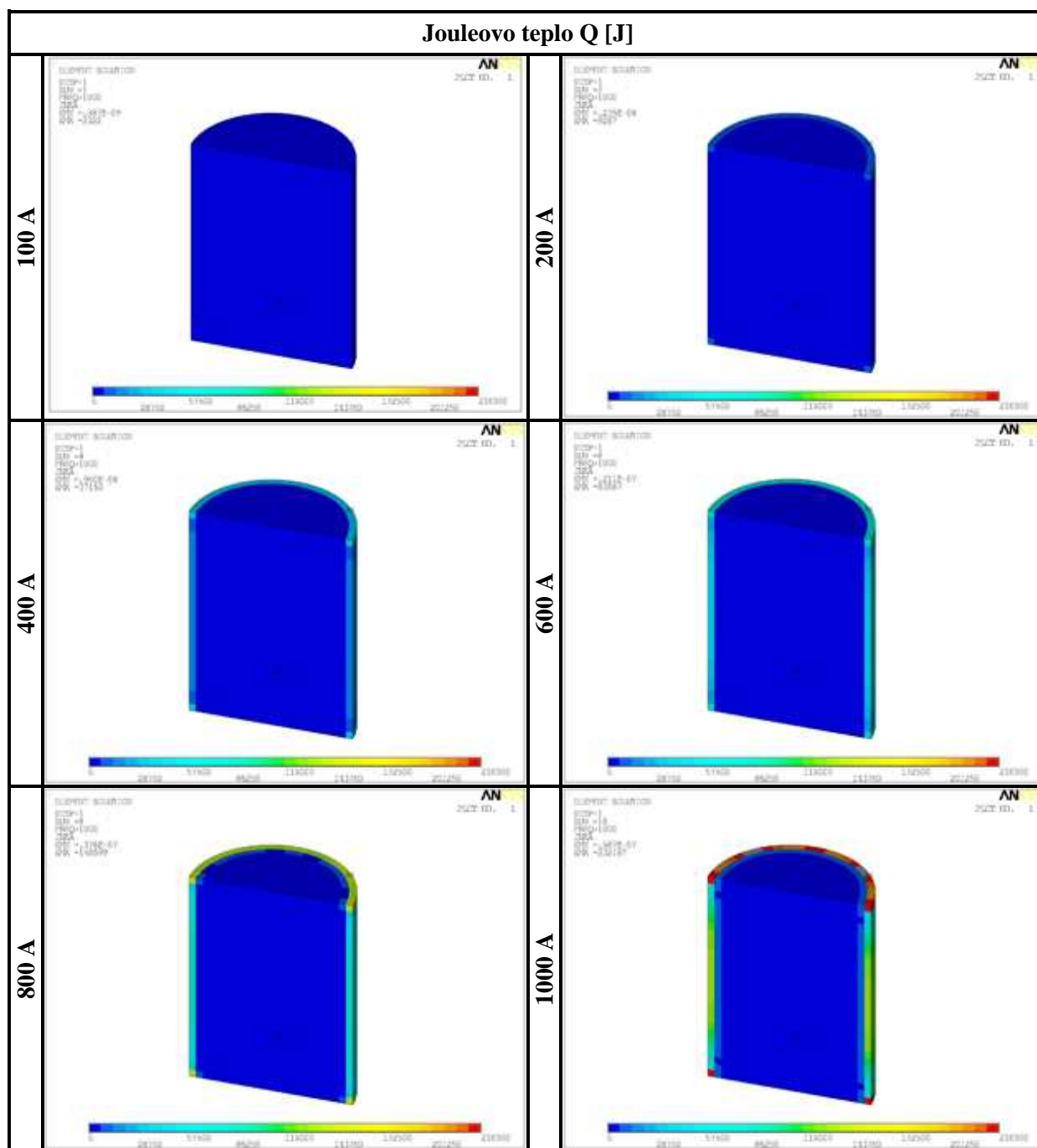
Tab. 10: Zvětšený výřez elektromagnetického pole indukční pece s $\mu_r = 1$



Tab. 11: Jouleovy ztráty - výsledkový přehled



Tab. 12: Přehled výpočtu proudové hustoty pro reálnou a imaginární složku



Tab. 13: Tabulkový přehled Jouleova tepla pro proudy v rozmezí 100 – 1000 A

Pro všechny výpočty byla nastavena hodnota permeability $\mu_r = 1$. Protože se jedná o harmonický výpočet výsledky jsou rozděleny na reálnou a imaginární část. Imaginární část je vůči reálné části posunuta o 90° .

Závěr:

V této diplomové práci jsem se zabýval analýzou elektromagnetického pole pro typovou vakuovou indukční pec, tato práce navazuje na předchozí diplomovou práci. Úkolem bylo provést 3D harmonickou analýzu za pomoci virtuálního modelu v programovém prostředí ANSYS 11. 3D model který jsem vytvořil ve virtuálním prostředí odpovídá rozměrům vakuové indukční pece běžně používané v průmyslu.

V průběhu zpracování praktické části diplomové práce nastali komplikace, které ne vždy bylo možné vyřešit ať už z důvodu programového či časového. Cílem práce bylo analyzovat rozložení a velikost vířivých proudů v tavenině a okolí taveniny při pracovní frekvenci 1000 Hz. Vzniklé vířivé proudy ohřívající taveninu, také oslabují vzniklé magnetické pole v tavenině. Při sečtení magnetického pole vířivých proudů a magnetického pole cívky induktoru vznikne největší mag. pole mezi taveninou a cívkou induktoru. Vířivé proudy tedy negativně ovlivňují výkonnost pece a její účinnost.

Ve výsledných tabulkách pak vidíme rozložení a velikosti intenzit magnetického pole a magnetické indukce s reálnou a imaginární složkou pro permeabilitou 1. Induktor je z měděného materiálu s rezistivitou $\rho = 2 \cdot 10^{-8}$, tavenina je z oceli o rezistivitě $\rho = 2 \cdot 10^{-7}$. Se zvyšující se teplotou taveniny (ocel) dochází ke snižování permeability až do fáze, kdy je úplně roztavená a permeabilita se blíží hodnotě 1. Z uvedené analýzy lze také určit hloubku vniku magnetického pole. Přínosem práce je především navrhnutí optimálních rozměrů cívky induktoru a kelímku z uvedených výpočtů a tím docílit snížení celkových ztrát na minimum.

Simulace výpočtu proběhla pro tři hodnoty proudového zatížení 300 A, 600 A a 1000 A, které odpovídají proudovému rozsahu pracovního zatížení dané pece. Tato práce byla náročná na výkon počítače především paměť RAM a obohatila mě v možnostech pracovat v programových prostředích jako jsou SolidWorks 2009, ANSYS 11Workbench nebo ANSYS 11 basic a především pochopit princip funkce vakuové indukční pece a harmonické analýzy.

Seznam použité literatury a citací:

1. LANGER, Emil, Teorie indukčního a dielektrického tepla, vydala Academia Praha 1979, nakladatelství ČSAV. 2. vydání 320str.
2. PLCH, Jiří, Elektrické teplo, Brno 1988. Ediční středisko VUT Brno. 2. vydání 192str.
3. DĚDEK, Libor, Teorie elektromagnetického pole, Brno 1990, Ediční středisko VUT Brno, ISBN 80-214-0219-9, 1. vydání 218str.
4. HRADÍLEK, Zdeněk, Elektrotepelná technika, Ostrava 1996, Ediční středisko VŠB Ostrava, ISBN 80-7078-323-0
5. KULDA, Jiří, Magnetické pole v silnoproudé elektrotechnice, Vydala Academia Praha 1974
6. Wikipedia, elektronická encyklopedie, zdroj <http://cs.wikipedia.org>
7. CHOVANEC, Lubomír, modelová FEM analýza elektromagnetického pole typové indukční pece, diplomová práce, Ostrava 2009
8. ANSYS manuál, průvodce analýzou elektromagnetických polí, ANSYS průvodce
9. <http://k315.feld.cvut.cz/download/men/COUP5.pdf> použitý zdroj ze dne 15.1.2010
10. <http://fyzika.jreichl.com/index.php?sekce=browse&page=296> použitý zdroj ze dne 23.2.2010
11. HRADÍLEK, Zdeněk, Elektrotepelná technika, skripta
12. http://www.odbornecasopisy.cz/index.php?id_document=25267 použitý zdroj ze dne 10.1.2010
13. LIST, Vladimír, Elektrotechnika V, Elektrické teplo, Praha 1958, SNTL
14. http://panther.feld.cvut.cz/cs/wiki/indukcni_ohrev použitý zdroj ze dne 17.11.2009
15. <http://www.danyk.wz.cz/induk2.html> použitý zdroj ze dne 14.10.2009
16. <http://www.cgg.cvut.cz/members/cadikm/school/spse/ha.html> použitý zdroj ze dne 18.3.2010